



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu

Juuso Mantere

LED-pohjaisen standardilampun lämpötilasäätö

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 21.1.2018

Valvoja: Professori Erkki Ikonen

Ohjaaja: TkT Timo Dönsberg & TkT Tuomas Poikonen

AALTO-YLIOPISTO TEKNIIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Juuso Mantere			
Työn nimi: LED-pohjaisen standardilampun lämpötilasäätö			
Korkeakoulu: Sähkötekniikan korkeakoulu			
Laitos: Master's Programme in Automation and Electrical Engineering			
Professuuri: Translationaalinen tekniikka		Koodi: ELEC3023	
Työn valvoja: Professori Erkki Ikonen			
Työn ohjaaja(t): TkT Timo Dönsberg & TkT Tuomas Poikonen			
<p>Tässä työssä on tutkittu fotometriassa mahdollisesti tulevaisuudessa käytettävän LED-pohjaisen standardilampun lämpötilasäätöä. Nykyään käytetyt hehkulamppupohjaiset standardilamput ovat käymässä harvinaisiksi ja samalla kalliiksi vaihtoehtoiksi kalibrointikäytössä. Jotta hehkulamput voidaan korvata LED-lampuilla, on ensin kuitenkin varmistuttava niiden ominaisuuksien, erityisesti niiden tuottaman valon suhteellisen spektrin ja valovirran stabiilisuuden sopivuudesta fotometrisiin standardimittauksiin. Tässä työssä on selvitetty huoneenlämpötilan vaihtelun vaikutusta LED-lampun toimintaan sekä rakennettu prototyyppi standardilampun lämpötilasäätimestä, joka kompensoi huoneenlämpötilan vaihtelut pyrkien pitämään LEDin tuottaman valovirran vakiona.</p> <p>LED-lampun lämpötilan muutos vaikuttaa sen säteilemään spektriin sekä valovirtaan. Huoneenlämmön vaihteluväli voi olla jopa $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pitkällä aikavälillä mittauksen aikana, tai kaksi eri laboratoriota voivat olla säädetty lämpötilaltaan eri arvoihin. Tämän vaihtelun ehkäisemiseksi rakennettiin laite, joka säätää LEDin lämpötilaa kolmella eri tavalla; lämmittämällä, jäähdyttämällä sekä näiden yhdistelmällä. Paras tulos saatiin yhdistelmämenetelmällä, joka käytti sekä lämmitystä että jäähdytystä. Prototyypillä lämpötila saatiin pysymään $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:een tarkkuudella tavoitelämpötilassa.</p>			
Päivämäärä: 21.1.2018		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 4 + 41	
Avainsanat: Fotometria, standardilamppu, hehkulamppu, loistediode, LED, lämpötilansäätö			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Juuso Mantere			
Title: Temperature Control of LED-Based Standard Lamp			
School: School of Electrical Engineering			
Department: Master's Programme in Automation and Electrical Engineering			
Professorship: Translational Engineering		Code: ELEC3023	
Supervisor: Professor Erkki Ikonen			
Instructor(s): Dr. Timo Dönsberg & Dr. Tuomas Poikonen			
<p> This work studies the temperature control of LED-based standard lamps, which could be used in the future in photometric measurements. Currently used incandescent standard lamps are getting rare and at the same time, more expensive alternatives for calibration usage. In order to replace incandescent lamps with LED-lamps, their features have to be confirmed, especially their light's relative spectrum, luminous flux's stability and suitability for photometric standard measurements. In this work it has been studied room temperature variation's effects on LED lamp's functioning and built a prototype for temperature controller of standard lamps which compensates variations in room temperature while keeping the LED's luminous flux constant. </p> <p> Change in temperature of the LED lamp has an effect on its radiation's spectrum and luminous flux. Variation in room temperature can be even ± 3 °C during one long term measurement, or two different laboratories can be set to different temperatures. To prevent this variation, a prototype was built, which controls LED's temperature by three different ways; heating, cooling and combination of these two. Best results were obtained with combination of heating and cooling. The prototype managed to keep the temperature within 0,5 °C from the set temperature. </p>			
Date: 21.1.2018		Language: Finnish	
		Number of pages: 4 + 41	
Keywords: Photometry, standard lamp, incandescent, light-emitting diode, LED, thermal control, temperature control			

Alkusanat

Diplomityön aiheesta keskusteltiin aluksi TkT Timo Dönsbergin kanssa, joka esitteli erilaisia aiheita, joiden tutkimisesta olisi hyötyä Aalto-yliopiston mittaustekniikan tutkimusryhmälle. Lopulta päädyttiin aiheeseen LED-pohjaisen standardilampun lämpötilansäädöstä. Dönsbergistä tuli myös työn ohjaaja yhdessä TkT Tuomas Poikosen kanssa. Työn valvojaksi valikoitui professori Erkki Ikonen. Vaikka työ venyikin lopulta ajallisesti varsin pitkäksi, haluan kiittää ohjaajiani asiantuntevasta tuesta ja avustuksesta koko työn aikana.

Espoo 21.1.2018

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Juuso Mantere', written in a cursive style.

Juuso Mantere

Sisällysluettelo

Lyhenteet	2
Symbolit	3
1. Johdanto	4
2. Fotometria	6
2.1. Valo ja ihmissilmä	6
2.2. Suureet	8
2.3. Standardihehkulamppu	10
2.4. Integroiva pallo	12
3. LEDien fotometria	13
3.1 LED-lamput	13
3.2. LED-pohjaiset standardilamput	14
3.3. Vaatimukset standardilampulle	17
3.4. Lämpötilan vaikutukset	19
4. Standardilampun lämpötilasäätö	21
4.1. Testattavat lamput	22
4.2. Lämmituselementti	24
4.2.1. Lämpövastuksien mittaus	27
4.2.2 Lämpövastuksien ohjaus	32
4.3. Jäähdytuselementti	34
4.3.1. Jäähdytuselementin ohjaus	34
5. Mittaustulokset	37
5.1. Mittaustulosten arviointi	38
6. Johtopäätökset	39
Lähteet	40

Lyhenteet

CCT	Korreloitu värilämpötila (Correlated Color Temperature)
CIE	Kansainvälinen valaistuskomissio (Commission Internationale de l'Eclairage)
IR	Infrapuna (Infrared)
LED	Loistediodi (Light Emitting Diode)
NMI	Kansallinen mittanormaalilaboratorio (National Measurement Institute)
NPN	NPN-tyyppinen bipolaaritransistori
PNP	PNP-tyyppinen bipolaaritransistori
PQED	Ennustettava kvanttidetektor (Predictable Quantum Efficient Detector)
PLC	Verkkojakso (Power Cycle Line)
PTC	Positiivinen lämpötilakerroin (Positive Temperature Coefficient)
RGB	Punainen, vihreä ja sininen väri (Red, Green, Blue)
SI	Kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä (Système International d' Unités)
SSL	Puolijohdekomponentteihin perustuva valaistus (Solid-State Lighting)
UV	Ultravioletti (Ultraviolet)

Symbolit

A	Pinta-ala
E	Energia
E_v	Valaistusvoimakkuus
I	Sähkövirta
I_v	Valovoima
L_v	Luminanssi
K_m	Spektrien valotehon kerroin
P	Pätöteho
R	Resistanssi
R_{th}	Lämpöresistanssi
T_c	Väriämpötila
U	Jännite
$V(\lambda)$	Standardihavainnoijan suhteellinen spektrinen herkkyys
c	Valonnopeus tyhjiössä
c_{th}	Ominaislämpökapasiteetti
f	Taajuus
h	Planckin vakio
m	Massa
t	Aika
Ω_A	Avaruuskulma
θ	Säteilyn tulokulma
λ	Aallonpituus
λ_{th}	Lämmönjohtavuus
φ_v	Valovirta
η_v	Valotehokkuus

1. Johdanto

Tässä työssä on tutkittu LED-pohjaisen standardilampun lämpötilasäätöä. Työn tarkoituksena on syventää ymmärrystä mahdollisuuksista hyödyntää LED-lamppuja perinteisten hehkulamppujen sijasta fotometrisissa mittauksissa. Standardilamppuja käytetään fotometrian mittalaitteiden kalibroimiseen, fotometrinen suureiden ylläpitoon ja kansainvälisiin vertailumittauksiin, jolloin eri laboratoriot mittaavat toistensa standardilamppuja ja vertaavat tuloksia keskenään. Tänä päivänä standardilamput ovat vielä erikoisvalmisteisia hehkulamppuja ja niiden elinikä on vain muutama sata tuntia. Vaikka lamppuja käytetäänkin harvoin ja vain vähän aikaa kerrallaan, ikääntyvät ne varsin nopeasti. Ongelmaksi muodostunee myös lähitulevaisuudessa niiden heikko saatavuus sekä samasta syystä aiheutuva korkea hinta.

LED-pohjaisilta standardilampuilta odotetaan huomattavasti pidempää käyttöikää perinteisiin kalibroinneissa käytettäviin standardihehkulamppuihin verrattuna. Niiden etuihin sisältyy lisäksi edullisempi hinta, tasaisempi valovirta sekä paremmin säädettäviä ominaisuuksia mm. säteilykulmassa sekä spektrissä. Siirtymistä LED-lamppujen käyttöön perustellaan myös sillä, että teollisuus sekä kuluttajamarkkinat ovat siirtyneet käytännössä kokonaan LED-valojen käyttöön. Jos myös mittalaitteiden kalibroinneissa käytettävät hehkulamput vaihdettaisiin spektrisiltä ominaisuuksiltaan lähempänä mitattavia LED-tuotteita oleviin LED-standardilamppuihin, saavutettaisiin etuja myös pienempien spektristen virheiden muodossa. LED-standardilampun spektrin sekä valovirran on pysyttävä tasaisena mittauksien välissä siitä riippumatta onko niiden välissä lyhyt tai pitkä aika. Valovirtaan vaikuttaa esimerkiksi lampun lämpötila, johon mittaustilan huoneenlämmöllä on vaikutusta. Huoneenlämpötilan muutokset voivat olla jopa luokkaa ± 3 °C esimerkiksi eri vuodenaikoina, riippuen mittaustilan lämpötilansäädön tehokkuudesta ja riittävydestä. Tämän lisäksi eri testauslaboratorioissa sijaitsevat mittaushuoneet saattavat olla asetettu eri lämpötiloihin johtuen paikallisten standardien eroista, tai siitä että ko. mittaushuoneiden lämpötila on asetettu vastaamaan jonkun toisentyypin mittauksen vaatimuksia, mitä tiloissa etupäässä tehdään. Lämpötilasäädetyllä standardilampulla voidaan varmistaa, että ko. lampun ominaisuudet vastaavat eri mittauspaikoissa toisiaan.

Tässä työssä on tutkittu LED-lampun lämpötilasäätöä sekä rakennettu lämpötilasäätimen prototyyppi, jonka tarkoituksena on ehkäistä huoneenlämpötilan vaihtelusta aiheutuvat mittaustulosmuutokset asettamalla LED-standardilamppu

vakiolämpötilaan. Lämpötilan säätö tehtiin kolmella eri tavalla, lämmittämällä, jäähdyttämällä sekä näiden yhdistelmällä. Työn alussa on käyty läpi fotometrian perusteita sekä valon ja ihmissilmän ominaisuuksia. Tämän jälkeen on esitelty fotometrian kannalta oleelliset suureet, mittauksissa käytettävä standardihehkulamppu sekä fotometrisistä mittausten menetelmistä integroiva pallo. Seuraavana työssä on esitetty, kuinka LED-lamput toimivat sekä millaisia vaatimuksia LED-standardilampulle on asetettava. Etenkin lämpötilan vaikutuksiin on kiinnitetty huomiota LEDien ominaisuuksia tarkasteltaessa, lämpötilan vaikuttaessa lampun valovoimaan sekä säteilyn spektriin. Työn lopussa on kuvattu lämpötilasäätimen prototyypin suunnittelu, rakennus sekä mittaustulokset.

2. Fotometria

Radiometriassa tutkitaan sähkömagneettisen säteilyn etenemistä sisältäen erilaisista väliaineista aiheutuvan heijastumisen, taittumisen, absorboitumisen, läpäisyn sekä sironnan [1] [2]. Fotometria on radiometriasta eriytynyt tieteenhaara [3], jota käytetään samaan tarkoitukseen kun tutkittavana on ihmissilmän havaitsema säteily, eli valo. Tämä tarkoittaa tiettyä rajattua osaa sähkömagneettisen säteilyn spektristä, jonka eri arvoja painotetaan eri arvoilla silmän vastetta vastaavasti [1] [4]. Näkyvänä valona pidetään yleisesti säteilyn aallonpituuksia välillä 360 – 830 nm [2] [5]. Havaitun valon määrän mittaamiseen käytetään CIE:n kehittämiä standardihavainnoijan skotooppista ja fotooppista valotehofunktiota, joilla pyritään mallintamaan keskimääräisen ihmissilmän vastetta valolle [6].

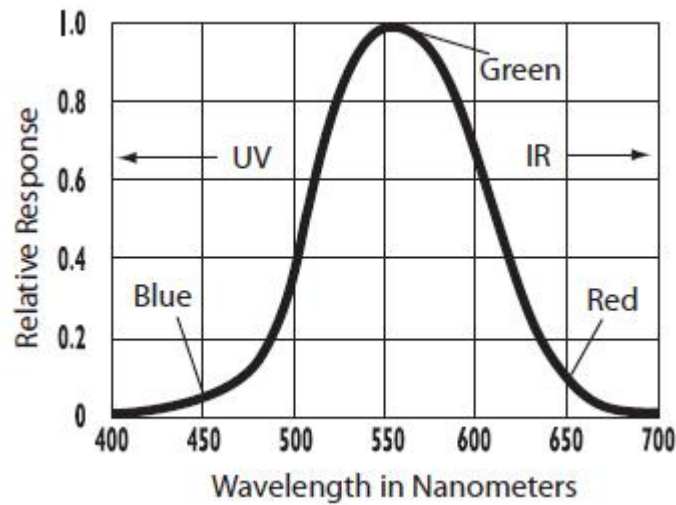
Fotometrisiä mittauksia tehdään yleensä käyttämällä fotometriä, eli optisesti suodatettua detektoria, jonka suhteellinen spektrinen vaste on lähellä standardihavainnoijalle määritettyä ihmissilmän herkkyyssäyriä, $V(\lambda)$. Fotometrisiä mittauksia varten käytettävän fotometrin valaistusvoimakkuusvaste on kalibroitava, jotta sen näyttämään voitaisiin luottaa. Tyypillisesti fotometrin valaistusvoimakkuusvaste kalibroidaan vertaamalla kalibroitavan laitteen näyttämää vasteeltaan tunnetun fotometrin näyttämään mitattaessa samalla mittausetäisyydellä kalibroinnissa käytettävästä stabiilista valonlähteestä [7]. Kalibrointi voidaan tehdä myös laskemalla referenssivalaistusvoimakkuus kalibroinnissa käytettävän standardilampun valovoimasta ja mittausetäisyydestä käänteisen neliölain mukaisesti.

Tyypillisesti fotometri koostuu tarkkuusapertuurista, $V(\lambda)$ -suodattimesta sekä detektorista, joka on yleensä piifotodiodi. Useampaa fotodiodia hyödyntämällä voidaan rakentaa myös ns. trap-detektori, jonka kokonaisheijastus takaisin detektorista on hyvin pieni [7]. Jotta fotometriä voidaan ymmärtää, on kuitenkin ensin ymmärrettävä mitä valo on ja kuinka ihmissilmä aistii sitä.

2.1. Valo ja ihmissilmä

Valo on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on välillä 360 – 830 nm [2] [5]. Tällä välillä eri aallonpituudet aistitaan eri väreinä. Spektrin ulkopuolelle jäävät alueet ovat pienemmillä aallonpituuksilla ultraviolett- (UV), röntgen- ja gammasäteilyä. Vastaavasti näkyvää valoa suuremmilla aallonpituuksilla esiintyy infrapunasäteilyä (IR), mikro-, radio- ja pitkiä radioaaltoja. Kuvassa 1 on esitetty silmän aistimat värit

näkyvän valon spektrissä. Kuvassa on myös esitetty kuinka hyvin ihmissilmä aistii eri aallonpituuksia suhteessa toisiinsa. Parhaiten aistitaan 555 nm:n vihreää valoa.



Kuva 1 Silmän herkkyys eri näkyvän valon spektrin aallonpituuksille. [8]

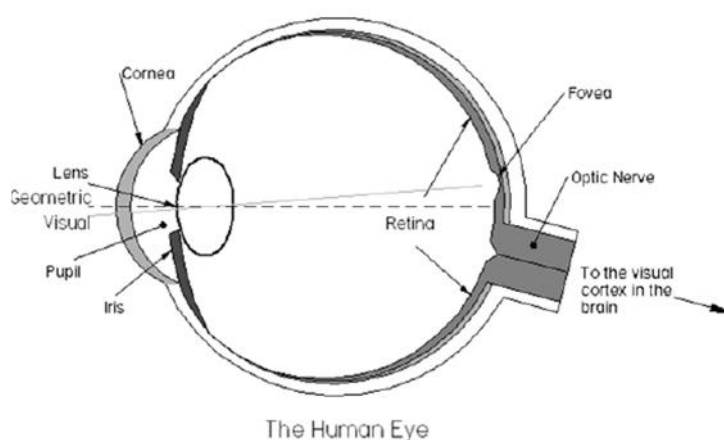
Valon käyttäytymistä voidaan mallintaa klassisen fysiikan aaltoliikemallin mukaisesti. Aaltoliikemallin lisäksi valon käyttäytymistä voidaan kuvata hiukkasmallilla. Tätä kahden eri tavan mallinnusta kutsutaan aalto-hiukkasdualismiksi. Tämän mukaan sähkömagneettisella säteilyllä ja aineella on sekä aaltoliikkeen että hiukkasten ominaisuuksia. Fotonin energia suhteessa aallonpituuteen voidaan määrittää kaavalla 1,

$$E = \frac{hc}{\lambda} \approx hf, \quad (1)$$

jossa E on energia, λ on aallonpituus, $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Js on Planckin vakio, $c = 2,997 \times 10^8$ ms⁻¹ on valonnopeus tyhjiössä ja f on taajuus. Nämä yhtälöt antavat yhteyden fotonien aalto- sekä hiukkasmallille [2].

Ihmissilmä aistii valoa absorboivien fotoreseptorimolekyylien avulla. Fotoreseptoreita on kahdenlaisia – sauva- ja tappisoluja. Näistä molemmat sisältävät pigmenttimolekyylejä, jotka aktivoituvat fotoneista. Tämän seurauksena ne tuottavat signaaleja, jotka tulkitaan aivoissa visuaalisiksi havainnoiksi. Sauvasoluissa on vain yhdenlaisia pigmenttimolekyylejä, rodopsiini, joiden absorptiomaksimi on 507 nm:ssa. Koska pigmenttimolekyylejä on vain yhdenlaisia, sauvasolut aistivat käytännössä vain valon kirkkauden muutoksia. Esimerkiksi pimeässä emme erota eri värejä, vain tummempia ja vaaleampi harmaan sävyjä. Tappisoluissa puolestaan on kolmenlaisia pigmenttimolekyylejä, joiden absorptiospektrit ovat laajoja ja

päällekkäisiä. Tappisolujen pigmenttimolekyylit mahdollistavat eri värien aistimisen. Fotonit aktivoivat pigmenttimolekyylejä eri voimakkuuksilla riippuen fotonin taajuudesta. Tämä tarkoittaa, että fotoreseptorien vastaanottaessa energialtaan vastaavan määrän eri taajuisia fotoneita, toiset niistä saavat fotometriassa suuremman arvon, kuin toiset. Esimerkiksi, silmän vasteen maksimiaallopituus on 555 nm, joka vastaa vihreää valoa [2] [8]. Verrattaessa absoluuttiselta energialtaan samaa määrää 555 nm ja 500 nm valoa, 500 nm:n valoa aistitaan vain noin puolet verrattuna 555 nm:n valoon. Sauvasolut sijaitsevat silmässä retinassa fovean ulkopuolella, kun taas tappisolut sijaitsevat foveassa [2]. Silmän eri osia on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Silmä ja sen eri osa-alueet. [2]

Käytettävää retinan aluetta säädetään pupillissa olevalla linssillä. Käytännössä tämä säätö tarkoittaa käytettävien fotoreseptorien valitsemista, sopeutumista pimeisiin tai valoisiin olosuhteisiin. Tämä tarkoittaa, että sauvasolujen aistima valaistuksen muutos on niin kutsuttua pimeännäköä, jossa ei eroteta värejä. Valoisissa olosuhteissa tappisolut ovat toiminnassa ja värien aistiminen on mahdollista. Näiden eri pigmenttimolekyylien toiminnalla on päällekkäisyyttä, mutta niiden toiminta-alueiden perusteella ihmisen näkö on jaettu kolmeen eri alueeseen valoisuuden perusteella; skotooppinen, mesooppinen ja fotooppinen alue. Skotooppisella alueella sauvasolut ovat pääsääntöinen havaitsija ja fotooppisella alueella puolestaan tappisolut. Mesooppinen alue sijaitsee näiden välissä [2]. Fotometria keskittyy lähes poikkeuksetta mittauksiin fotooppisella alueella.

2.2. Suureet

Fotometriassa käytettävät suureet ovat hyvin analogisia radiometrian suureiden kanssa. Valovoima (yksikkö candela, cd) kuuluu kansainvälisen mittayksikköjärjestelmän, SI-

järjestelmän, perussuureisiin [9]. Tämän lisäksi tärkeimpiä suureita fotometriassa ovat valovirta (lm), valaistusvoimakkuus (lx) sekä luminanssi (cd/m²), joiden merkitystä on selvennetty seuraavaksi. Lisäksi värilämpötilan määritelmä on selostettuna muiden suureiden lopuksi.

Valovirta, Φ_v , on fotometrian vastine radiometrian säteilyteholle Φ_e . Valovirran yksikkö lumen (lm) on vastine säteilytehon yksikölle watti. Valovirta on valonlähteen ympärisäteilemä kokonaisteho painotettuna ihmissilmän herkkyyssäyrällä. Valovirta voidaan laskea spektrisestä säteilytehosta käyttäen kaavaa

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

missä $K_m = 683 \text{ lm/W}$ kuvaa suhdetta radiometrian yksikön watin ja fotometrian yksikön lumen välillä [10]. Verrannollisuuskerroin, K_m , on määritetty lähellä fotooppisen alueen herkkyyssäyrän maksimia, $\lambda_m = 555 \text{ nm}$, olevan noin 683 lm W^{-1} . [6]

Valaistusvoimakkuus, E_v , on vastine radiometrian irradianssille ja sen yksikkö on luks (lx, lm/m²). Valaistusvoimakkuus tarkoittaa tietyn pinta-alayksikön läpi kulkevaa valovirtaa. Valaistusvoimakkuus voidaan määrittää kaavalla,

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{\cos\theta_d dA_d}, \quad (3)$$

missä θ_d on säteilyn tulokulma ja A_d on pinta-ala [6].

Valovoima, I_v , tarkoittaa pistemäisen lähteen valovirtaa avaruuskulmaa kohti. Historiallisista syistä yksikkönä käytetään kandela (cd), mutta se voitaisiin ilmaista myös lumeneina steradiaania kohti (lm/sr). Valovoima on radiometrian säteilyintensiteettiä vastaava suure. Se voidaan esittää kaavalla,

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega_A}, \quad (4)$$

missä Ω_A on avaruuskulma [6]. Yksi kandela vastaa karkeasti yhden kynttilän aikaansaamaa valovoimaa.

Luminanssi, L_v , on radiometrian radianssia vastaava suure. Se on valovirta pinta-alayksikköä kohden kiinteässä kulmassa. Sen yksikkö on cd/m² ja se voidaan esittää käyttäen kaavaa [6]

$$L_V = \frac{d\Phi_v}{\cos\theta_s dA_s d\Omega_A}. \quad (5)$$

Väriämpötila, T_c , on summittainen karakterisointi näkyvän valonlähteen spektrin jakaumasta [6]. Se on Planckin säteilijän, eli ideaalisen mustan kappaleen, lämpötila, jolla se tuottaa saman väristä valoa kuin kuvattu väriämpötila [11]. Sen käyttö on rajattu lähteisiin, jotka tuottavat laajakaistaista valoa, kuten hehkulamput tai muut yleisvalaistuksessa käytettävät valkoista valoa tuottavat lähteet. Väriämpötilan yksikkö on kelvin, K, ja se voidaan esittää matemaattisesti kaavalla,

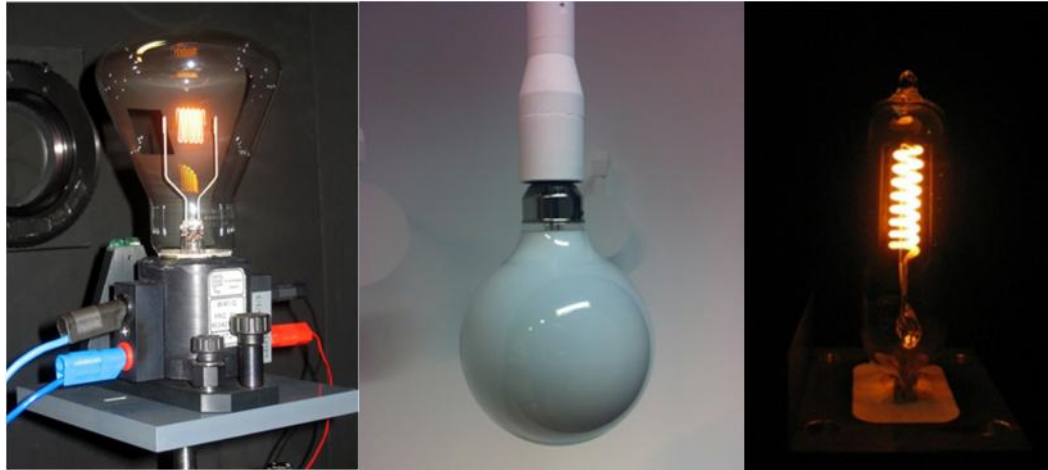
$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[1 - \frac{\phi_x(\lambda)}{a\phi_b(\lambda, T)} \right]^2 d\lambda \rightarrow \text{minimi}, \quad (6)$$

missä $\phi_x(\lambda)$ on lähteen suhteellisen spektrin jakauman tehofunktio, $\phi_b(\lambda, T)$ on mustankappaleen suhteellisen spektrin jakauman tehofunktio lämpötilassa T , ja a on mielivaltainen vakio. Integrointialue on näkyvän valon alue. Kuitenkin, koska mustan kappaleen säteilylämpötila on vain summittainen, tarkat arvot integraalin rajoille ovat periaatteessa mielivaltaisia. Kuitenkin tyypillisesti rajat ovat 400 ja 750 nm. Arvoja a ja T säädetään samanaikaisesti kunnes integraalin arvo on minimissään. Paras sovitus mustan kappaleen lämpötilalle on väriämpötila [6].

2.3. Standardihehkulamppu

Standardilamput ovat perinteisesti olleet volframi-halogeenilamppuja, eli hehkulamppuja, joissa on sisällä helogeenikaasua [12]. Ne emittoivat säteilyä laajalla spektrillä välillä 250 – 2500 nm [4]. Tämä alue on huomattavasti suurempi, kuin näkyvän valon alue (360 – 830 nm). Näin ollen ne säteilevät paljon energiaa, jota ei voida hyödyntää fotometrisissa mittauksissa tai kalibroinneissa. Spektrin ei-haluttujen osien suodattamiseen käytetään mittalaitteisiin sisäänrakennettuja $V(\lambda)$ -suodattimia. CIE:n standardin mukaan standardilamput on oltava väriämpötilaltaan 2856 K, mikä vastaa CIE:n Standard Illuminant A spektriä [7]. Tyypillisesti fotometrian standardilamput elinikä on muutama sata tuntia [4]. Standardilamppuja käytetään fotometrian mittalaitteiden kalibroimiseen, fotometrinen suureiden ylläpitoon ja kansainvälisiin vertailumittauksiin, jolloin eri laboratoriot mittaavat toistensa standardilamppuja ja vertaavat tuloksia keskenään. Kalibrointi on tyypillisesti vertailumittaus kalibroitavan laitteen ja referenssilaitteen välillä. Kalibrointireferenssi voi olla joko lähde tai laite riippuen sovitusta käytännöistä [4]. Mittalaboratorioiden kannalta hyvin oleellista on, että referenssi on jäljitettävissä. Kansainväliset vertailumittaukset tukevat laboratorioiden mittausepävarmuuksien määrittämistä ja

jäljitettävyysetjün luotettavuutta. Yksi yleisimmistä fotometrisistä mittalaitteista on integroiva pallo, josta on kerrottu kappaleessa 2.4. Standardilamppuja on useita erilaisia ja käytettävä lamppu riippuu suoritettavasta mittauksesta. Erilaisia standardilamppuja ovat esimerkiksi; Osram Wi41/G, Osram Wi41/G Globe sekä Osram FEL-S.T6 [4]. Nämä kaikki kolme erilaista standardilamppua on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Vasemmalta oikealle: Osram Wi41/G, Osram Wi41/G Globe ja Osram FEL-S.T6. [4]

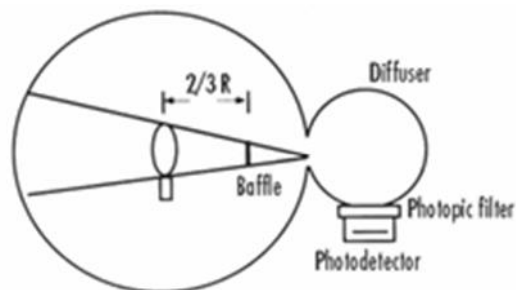
Osram Wi41/G tunnetaan lempinimellään Mushroom lamp (suom. sieni-lamppu). Se on yleisesti kansallisten mittanormaallaboratorioiden (NMI, National Metrology Institute) käytössä oleva standardilamppu, jota käytetään lähinnä valovoiman referenssinä. Ko. lähdeä käytetään myös mittauksissa, missä referenssinä käytetään vasteeltaan tunnettua referenssifotometriä. Tällöin kyseinen valonlähde toimii vain stabiilina valonlähteenä, jolla on standardin mukainen värilämpötila 2856 K (CIE Standard Illuminant A). Wi41/G-lampun tyypillinen valovoima on noin 300 cd ja se sopii valovoiman mittauksiin välillä 0,1 – 1000 lx. Esimerkkinä MIKES-Aalto Mittaustekniikan valovoimalamput mitataan kerran vuodessa 20 minuuttia kestäväällä mittauksella, minkä tarkoituksena on selvittää detektoripohjaisen fotometrian skaalan stabiilisuus. Tämä perustuu olettamukseen, että ko. valonlähteet eivät juurikaan muutu, kun niitä ei käytetä, joten havaitut muutokset perustuvat käytetyn fotometrin jäljitettävyysetjussa tapahtuneisiin muutoksiin tai mittausvirheeseen. Yhtä näistä referenssilampuista käytetään myös asiakkaille tehtävissä rutiinikalibroinneissa, jolloin käyttöä kertyy n. 10 tuntia vuodessa. Asiakaskalibroinneissa käytettävien lamppujen värilämpötila tarkistetaan vuosittain ja säädetään tarvittaessa muuttamalla lampun ajovirtaa [4].

Osram Wi41/G Globe on puolestaan valovirran standardilamppu, jonka mittaamiseen käytetään integroivaa palloa. Sillä on samantyyppinen hehkulanka kuin Wi41/G:llä, mutta se on rakennettu pyöreän lasikuvun muotoon, minkä pinta on diffuusiiläpäisevä. Wi41/G Globe lampun tyypillinen valovirta on noin 2000 lm. Mikes-Aalto Mittaustekniikalla on käytössä 5 kpl kyseisiä lampuja, joita käytetään valovirran skaalan ylläpitoon ja kansainvälisissä vertailumittauksissa [4].

Osram FEL-S.T6 on 1 kW:n volframi-halogeenilamppu, jota käytetään pääasiassa spektrisen irradianssin standardilamppuna. Ko. lamppu on huomattavasti Wi41/G lampua suuritehoisempi, nimellisteholtaan 1 kW, ja sen säteilemästä spektristä hyödynnetään myös UV- ja IR-aallonpituudet fotometrian aallonpituuksien lisäksi. Ominaisuuksiensa vuoksi FEL-lamput soveltuvat hyvin spetroradiometriä kalibrointiin, mutta niitä käytetään myös fotometrian kalibroinneissa, silloin kun tarvitaan 1000 – 5000 lx valaistusvoimakkuutta. Kuten fotometrisillä lampuilla, on FEL-lampun tyypillinen elinikä muutama sata tuntia. Ikääntyneen FEL-lampun huomaa visuaalisesti hehkulangan filamentin luhistumisesta [4].

2.4. Integroiva pallo

Valovirta voidaan mitata integroivan pallon avulla. Se on vanhin integroivan pallon mittaussovellus ja laajasti käytössä vielä tänäkin päivänä [13]. Mitattava valonlähde sijaitsee keskellä palloa ja mittauksissa käytettävä fotometri katsoo pallon sisälle pallon reunalla olevasta detektoriportista. Integroiva pallo nimensä mukaisesti integroi spatiaalisesti valovirran kaikista suunnista valonlähdeä, jolloin saadaan mitattua valonlähteen tuottama kokonaisvalomäärä, eli valovirta. Integroiva pallo on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Integroiva pallo. [13]

Valonlähteen ja fotometrin välissä on valoeste (baffle), joka estää fotometriä näkemästä suoraan valonlähteen detektoriportin suuntaan säteilemän valon [13]. Mittauksessa käytetään fotometriä, jossa on diffuuserilla varustettu sisääntulo-optiikka, jolloin

fotometri mittaa pallon seinämille muodostuvaa keskimääräistä valaistusvoimakkuutta. Suoraan detektorille tuleva valo aiheuttaisi liian suuren lukeman suhteessa seinämän kautta detektorille tulevaan diffuusiheijastuneeseen valoon. Valoeste on usein sijoitettu 2/3 säteelle pallon keskustasta [13]. Sen koko tulisi olla mahdollisimman pieni, niin että se juuri peittää valonlähteen detektorilta. Integroivan pallofotometrin valovirtavaste kalibroidaan tyypillisesti käyttämällä valovirraltaan tunnettua standardilamppua, jolloin tunnetun lampun ja mitattavan lampun tuottamien fotometrin signaalien suhdetta tarkastelemalla voidaan määrittää tutkittavan lampun valovirta. MIKES-Aalto Mittaustekniikassa integroivan pallofotometrin valovirtavaste kalibroidaan käyttäen stabiilia ulkoista valonlähdettä, pinta-alaltaan tunnettua tarkkuusapertuuria ja vasteeltaan tunnettua fotometriä, joilla muodostetaan ulkoinen referenssivalovirta, joka ohjataan integroivan pallon sisään pallon referenssiportista. Menetelmä on ensin mainittua monimutkaisempi, mutta mahdollistaa laitteiston monipuolisen käytön ja pienen (alle 1 %) mittausepävarmuuden [14].

Integroivan pallon avulla voidaan mitata lampun valovirta. Kun mittaukseen lisätään tutkittavan lampun sähkötehon mittausta, on mahdollista määrittää lampun valotehokkuus, η_v , jonka yksikkö on lm/W. Valotehokkuus voidaan määrittää kaavalla,

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P}, \quad (7)$$

missä P on lampun kuluttama sähköinen pätöteho [14].

3. LEDien fotometria

3.1 LED-lamput

Loistediodi tai hohtodiodi, eli LED (Light-Emitting Diode), on komponentti, joka muuttaa sähköenergiaa sähkömagneettiseksi säteilyksi, yleensä suurimmilta osin näkyväksi valoksi [15]. Sen keksiminen pohjautuu vuoteen 1907, jolloin Henry J. Round huomasi piikarbidikiteen tuottavan valoa, kun siihen kytkettiin jännite [16]. Kesti vielä kuitenkin jonkin aikaa, ennen kuin löydöstä oli jalostettu kaupallisesti hyödynnettävä tuote. Ensimmäiset kaupalliset LED:it ilmestyivät 1960-luvulla [16]. Ne olivat punaisia ja kellertävän vihreitä. Niitä käytettiin esimerkiksi merkkivaloina elektroniikassa. Vasta kun vuonna 1993 kehitettiin sininen ja kirkkaan vihreä LED, alettiin kaupallisissa tuotteissa nähdä kaiken värisiä LEDejä [17]. Tämä aloitti LEDien leviämisen yhä uusiin ja uusiin erilaisiin sovelluskohteisiin. Nykyään niitä

hyödynnetään esimerkiksi televisioiden taustan valonlähteenä, yleisvalaistuksessa, valotauluissa ja lähes kaikkialla missä on perinteisesti käytetty hehkulamppuja.

Energiaa säästävät LED-pohjaiset lamput ovat syrjäyttäneet hehkulamppuja arkielämässämme ja niin on käymässä myös kalibroinneissa käytettävien standardilamppujen kohdalla. Vanhojen hehkulampputyypisten standardilamppujen ongelmana on niiden vaikea saatavuus sekä korkea hinta. LEDeistä on mahdollista saada valkoista valoa kahdella eri tavalla. Valkoinen RGB-LED voidaan muodostaa kolmen erivärisen LEDin yhdistelmänä; punaisen, vihreän ja sinisen. Näiden RGB-värien sekoituksilla on mahdollista luoda erilaisia valkoisen valon sävyjä. Valkoinen valo sisältää kaikkia aallonpituuksia [17]. Myöhemmin havaittiin, että valkoinen LED on mahdollista tehdä myös sinisellä tai UV-diodilla, joka on päällystetty fosforilla. Tämä jälkimmäinen menetelmä on huomattavasti käytännöllisempi fotometrian tarkoituksissa ja myös eniten suosittu yleisvalaistukseen myytävissä tuotteissa, kuten LED-lampuissa ja valaisimissa. Joissakin LED-tuotteissa hyödynnetään siniseen LEDiin ja fosforiin perustuvien valkoisten LEDien lisäksi punaisia LEDejä, millä voidaan saavuttaa vielä parempi värientoisto.

LED:in toiminta perustuu puolijohdetekniikkaan. Kun PN-liitoksen päiden välille kytketään sopiva jännite, elektronit järjestäytyvät uudelleen elektroniaukkojen kanssa vapauttaen samalla energiaa fotonien muodossa. Tätä ilmiötä kutsutaan elektroluminenssiksi. Ilmiössä syntyvän valon väri riippuu puolijohteen energiavyöstä. Eri värejä luodaan eri puolijohteiden avulla.

3.2. LED-pohjaiset standardilamput

Kun erilaisissa valaistusratkaisuissa siirrytään yhä suuremmissa määrin käyttämään LED-lamppuja perinteisten lamppujen sijasta herää kysymys onko LED-valaistuksen mittaamiseen käytettävien mittalaitteiden kalibroinneissa käytettävien standardilamppujen järkevää olla enää hehkulamppuja vai pitäisikö niidenkin olla LED-pohjaisia [7]. Oleellisin asia LED-lamppujen käyttöön siirtymisessä kalibroitamiseksi olisi, että niiden spektrit ovat lähellä LED-valaistuksen spektrimuotoa, jota kalibroitavilla laitteilla kuitenkin mitattaisiin. Esimerkiksi, jos hehkulampulla kalibroidulla fotometrilla mitataan LED-valaistusta, se aiheuttaa virhettä mittaukseen. Tämä johtuu hehkulampun ja LEDin erilaisesta spektristä. Siinä missä hehkulampun spektri nousee tasaisesti, on valkoisella LEDillä piikki sinisellä aallonpituudella ja fosforin muodostama kumpu ylemmillä aallonpituuksilla. Johtuen fotometreissa

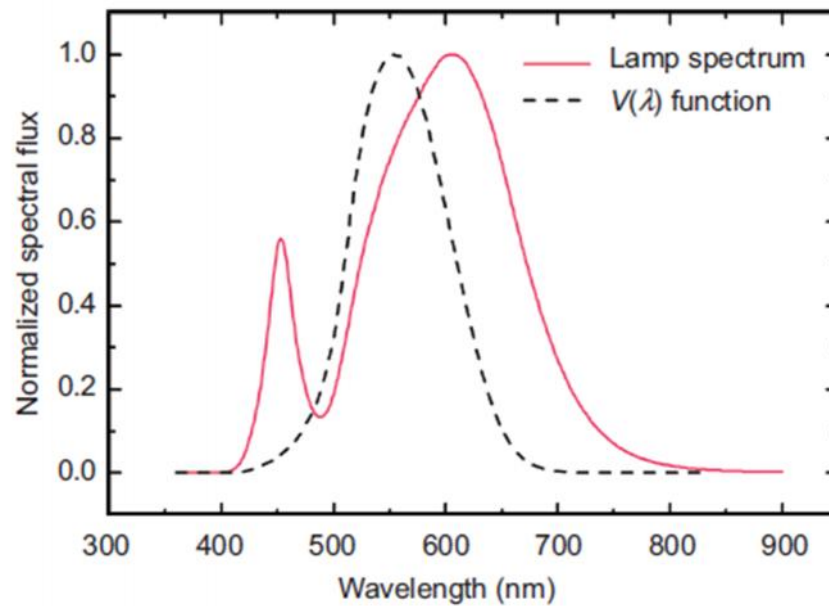
käytettävistä $V(\lambda)$ -suodattimista, fotometrin spektrinen herkkyys ei koskaan pysty täydellisesti jäljittelemään CIE:n määrittelemää $V(\lambda)$ -käyrää. Riippuen aallonpituudesta, voivat poikkeamat määritelmästä $V(\lambda)$ -käyrästä olla useita prosentteja. Mitattaessa yksivärisiä LEDejä hehkulampulla kalibroidulla fotometrillä saatetaankin siis tehdä useiden prosenttien mittausvirheitä, koska valkoinen valo koostuu laajasta spektristä ja fotometrin tyypillinen spektrinen poikkeama fotometrisellä toiminta-alueella vaihtelee määritellyn $V(\lambda)$ -käyrän molemmiin puolin, tasoittuu mittausvirhe valkoista valoa mitattaessa pienemmäksi. Silti mittausvirhe ei täysin poistu, vaan jäljelle voi fotometrin suodatuksen laadusta riippuen jäädä vielä useiden prosenttien spektrinen virhe.

Koska tyypilliset valaistuksessa käytettävät LEDit säteilevät vain näkyvää valoa, niiden fotometrisissä mittauksessa ei ole välttämätöntä käyttää $V(\lambda)$ -suodatettua fotometriä [7]. LED-valaistusta voi periaatteessa mitata myös spektroradiometrillä, minkä jälkeen mitattua spektristä irradianssia painotetaan numeerisesti $V(\lambda)$ -käyrällä. $V(\lambda)$ -suodatetun fotometrin tarkoitus on painottaa mitattavaa spektristä säteilyä ihmissilmän herkkyyskäyrän mukaisesti, jolloin UV- ja IR-säteilyn vaikutus lähes poistuu ja mittaustulos vastaa sitä valotasoa, minkä ihmissilmä keskimäärin havaitsee. LEDien kanssa mittaukset voidaan tehdä ilman suodattimia painottamalla säteilyn spektrin eri aallonpituuksia tunnetun jakauman perusteella. Kuvassa 5 on esitetty valkoisen LEDin normalisoitu spektri sekä ihmissilmän herkkyyskäyrä $V(\lambda)$, mikä on määritelty fotooppisella päivänäkemisen herkkyysalueella.

PQED (Predictable quantum efficient detector) on hyvin tarkka laajakaistainen detektori, jonka absoluuttinen spektrinen herkkyys voidaan ennustaa alle 0,01 %:n suhteellisella epävarmuudella. PQED:tä voidaan käyttää LEDien mittauksessa yhdistämällä ko. detektori tarkkaan suhteellisen spektriseen mittaukseen spektroradiometrillä. Tällöin mittauksessa hyödynnetään PQED:n hyvin tarkkaan tunnettua vastetta ja spektrimittauksesta saatavaa spektristä muotoa, joiden mittaustuloksista laskemalla saadaan määritettyä LEDille hyvin tarkka fotometrinen mittaustulos. PQED:llä ei voida mitata laajakaistaista hehkulamppua johtuen siinä olevasta UV- ja IR-säteilystä, koska varsinkin IR-säteily jatkuu aallonpituusalueella useisiin mikrometreihin, tehden spektrisestä mittauksesta haastavan. Lisäksi PQED:n vaste on tarkasti mallinnettavissa 400 – 900 nm aallonpituusalueella; tämän alueen ulkopuolella PQED:n vasteesta johtuva epävarmuus kasvaa huomattavasi. Mittaamalla stabiilin LED-standardilampun valaistusvoimakkuutta PQED-menetelmällä kalibroitaessa luksimittareiden

valaistusvoimakkuusvasteita laboratorio-olosuhteissa, voidaan fotometrinen yksiköiden realisoinnin epävarmuutta pienentää ja varmistaa, että fotometrian kalibrointeja voidaan jatkaa tulevaisuudessakin, kun hehkulamppujen tarjonta kalibrointikäyttöön ajetaan alas [7] [18].

Valkoisten LED:ien rajoitettu spektri mahdollistaa valon mittaamisen kansallisissa mittanormaallaboratorioissa jatkossa PQED-detektoreilla ilman $V(\lambda)$ -suodattimia.



Kuva 5. Valkoisen, värilämpötilaltaan 3018 K, LEDin suhteellinen spektri sekä CIE:n määrittelemä fotometriassa käytettävä $V(\lambda)$ -painotuskäyrä [7].

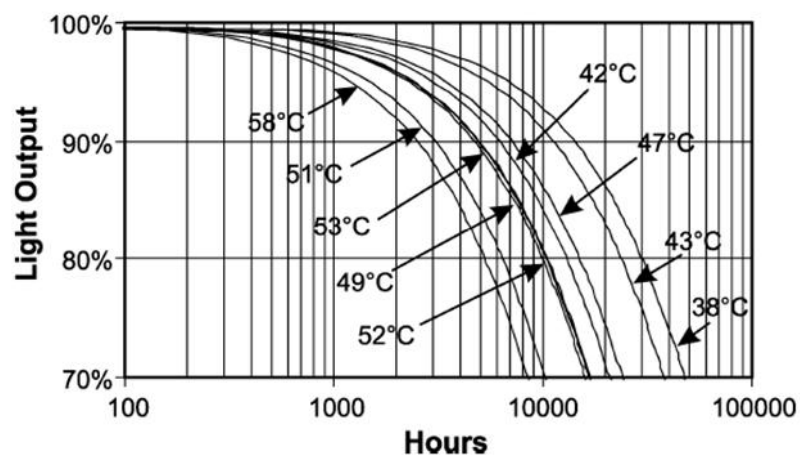
Kuvasta 5 nähdään, että valkoisen LED:in spektri levittäytyy aika laajalle alueelle fotometrisellä alueella. Kyseessä on fosforipäällysteinen sininen LED, jonka spektrissä nähtävän piikit aiheutuvat LED:in omasta sinisestä valosta (piikki noin 450 nm:n kohdalla) sekä fosforipäällysteestä, mikä konvertoi osan säteilystä korkeammille aallonpituuksille ja lähde näyttää ihmissilmällä katsottuna valkoiselta. LED-pohjaisen standardilampun värilämpötila olisi todennäköisesti lämminvalkoinen noin 3000 K tai kylmänvalkoinen noin 6000 K. Pulli *et. al* [7] mittasivat suuren joukon LED-lamppuja. Jos lamput jaettiin karkeasti kahteen ryhmään, spektreiltään kylmävalkoisiin ja lämminvalkoisiin lamppeihin, ko. ryhmien keskimääräiset värilämpötilat olivat 2935 K sekä 5716 K. Kylmänvalkoisella LEDillä sinisen piikin suhde fosforin kumpuun on pienempi kuin lämminvalkoisella LEDillä, jolloin mittauksessa käytettävä fotometri painottaa näitä aallonpituusalueita eri tavoilla, riippuen fotometrin suodattimen laadusta. Tämä tarkoittaa sitä, että LED-standardilamppuja kannattaisi rakentaa kahdella

lähellä näitä olevalla värilämpötilalla, jotta fotometrien valaistusvoimakkuusvasteet voitaisiin kalibroida vastaavilla spektreillä. Tällöin mitattaessa LED-valaistusta käyttäjä valitsisi kahdesta mitatusta vasteesta jommankumman, riippuen mitattaisiinko kylmä- vai lämminvalkoista LED-valoa, minimoiden mittauksen spektriset virheet [7].

LED-pohjaisten standardilamppujen etuina suhteessa standardihehkulamppuihin voidaan pitää niiden pidempää elinikää, tasaisempaa valovirtaa ja fyysistä kestävyyttä. LED:ien etuihin lukeutuu myös niiden ominaisuuksien helppo muokattavuus. Näihin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi valaistusalueen muoto, säteilyn määrä eri kulmissa sekä säteilyn spektri. LED-valot, toisinkuin hehkulamput, eivät myöskään turhaan säteile UV- sekä infrapunavaloa [7].

3.3. Vaatimukset standardilampulle

LEDit ovat perinteisiä hehkulamppuja huomattavasti kestävämpiä. Suurin LEDin kestävyteen vaikuttava yksittäinen tekijä on lämpötila PN-liitoksessa [19]. Kuvassa 6 on esitetty valkoisten LED:ien elinikä riippuen ympäröivästä lämpötilasta. Kuvasta voidaan nähdä, että LED:in valon ulostulo heikkenee ajan myötä [16] [19]. Tämän vuoksi on hyvin todennäköistä, että myös säteilyn spektri muuttuu ajan myötä. On olemassa myös LEDejä, jotka ikääntyvät huomattavan hitaasti. Baumgartner *et. al* [20] löysivät tutkimuksissaan LED-mallin, jonka valovirta pysyi 0,6 %:n sisällä 24 500 tunnin kiihdytetyn ikääntymisen ajan. Yleisesti muutos oli alle 4,3 %. Tämä tarkoittaa, että lamppujen elinikä voisi olla jopa kymmeniä vuosia, mikäli niitä käytetään vain muutama tunti päivässä [20].



Kuva 6. Valkoisten suuritehoisten LEDien valon intensiteetin muutos ajan funktiona eri lämpötiloissa. [19]

Standardilampun tulisi olla tuottamaltaan valovirralla erittäin stabiili sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä tässä tarkoitetaan tyypillisen kalibroitimittauksen kestoa (n. 1-2 tuntia) ja sen sisällä tehtäviä lyhyitä usean näytteen mittauksia, joiden tulisi kohista ja ryömiä mahdollisimman vähän, mielellään alle 0,1 %, jos kyseessä on AC-käyttöinen lamppu, tai alle 0,01 % jos kysessä on DC-käyttöinen lamppu. Tämän ajanjakson aikana kahden fotometrin mittaamia signaaleja vertaillaan keskenään. Tyypillisessä kalibroinnissa verrataan fotometrien signaaleja usealla eri valaistusvoimakkuustasolla, mikä toteutetaan mittaamalla ko. stabiilia valonlähdettä eri etäisyyksillä. Kullakin tasolla valaistusvoimakkuutta mitataan esim. 10-15 näytettä integroimalla fotometrien signaalia kutakin näytettä varten esim. 50-100 verkkojakson yli (PLC, power line cycle). Tämä tarkoittaa, että LED-lampun tuottaman valovirran värinä (rippeli) pitäisi olla korkeintaan luokkaa 0,1 %, jolloin 100 Hz:n tasasuunnattu komponentti ei näkyisi selvänä pulssina mittauksissa. Lamppu ei saisi ikääntyä myöskään pitkällä aikavälillä, myöskään kun se on pitkiä aikoja varastoituna. Lampun polttotunnit voivat jäädä jopa 1 - 2 tuntiin vuodessa, mikäli sillä tehdään vain pakolliset tarkistusmittaukset fotometrisen skaalan ylläpitoon liittyen. Mikäli sitä käytetään myös asiakkaiden laitteiden kalibroimisessa, polttotunteja voisi tulla noin 10 vuodessa. Tyypillinen mittaustilanne kestäisi puolesta tunnista tuntiin, jossa ensin annettaisiin lampun lämmetä käyttölämpötilaan (15 – 30 min). Tämän jälkeen tehtäisiin mittaukset kalibroidulla fotometrillä (1 – 2 min) sekä mahdollisesti spektrinen mittaus skannaavalla spektrometrillä spektrisen alueen, eli näkyvän valon, yli (noin 15 min).

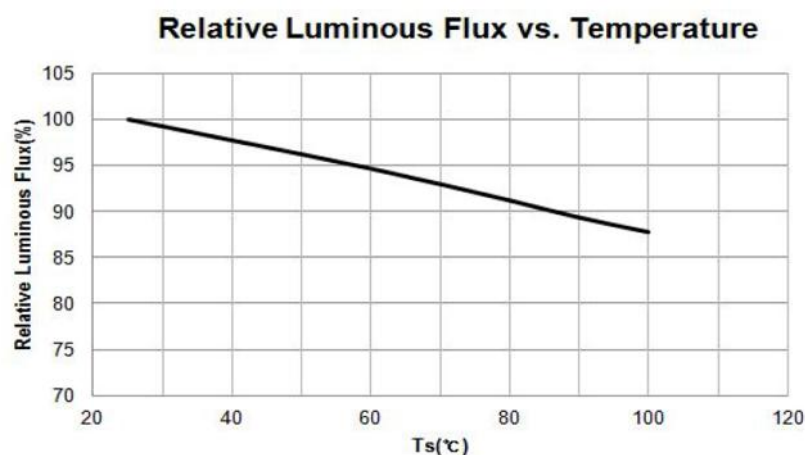
Standardilampun spektrin on myös pysyttävä mahdollisimman muuttumattomana lampun ikäänntyessä. Mikäli samalla tavalla suunnattua LED-lamppua mitataan spektrometrillä toistuvasti lampun ikäänntyessä, havaitaan sinisen LEDin ja fosforipäällysteessä muutoksia. Nämä muutokset ovat kuitenkin käytännössä hyvin pieniä, kunhan lampun on ensin annettu ikäänntyä hetken. LEDien kanssa, toisin kuin hehkulamppuja käytettäessä, ongelmaksi muodostuu LED-lampun tarkastelukulma. Tarkastaltaessa lamppua eri kulmista sen spektri muuttuu. Spektrometrillä mitattaessa etenkin sinisen valon ja fosforipäällysteen spektriin aiheuttamien piikkien suhteelliset tasot muuttuvat helposti. Mitattaessa esimerkiksi PQED:lla ilman $V(\lambda)$ -suodatinta tällä on suuri merkitys ja se on efektinä ainakin 10-kertainen verrattuna lampun ikäänntymisestä johtuvaan spektrin muutokseen. Asiaan voidaan vaikuttaa käytettävillä LEDeillä sekä lampun kuvun suunnittelulla, joka diffuusiheijastuksien ja läpäisyn

avulla tasoittaa spektrin tasaisemmaksi eri suuntiin lampusta. Tämä pienentää lampun suuntauksesta spektriseen mittaukseen syntyvää epävarmuutta.

Ennen mittausten aloittamista, lampun on annettava hakeutua sopivaan käyttölämpötilaan. Tämä johtuu LEDin lämpötilan vaikutuksesta sen valovirtaan. Esikäyttämällä lamppua ennen mittausta, saadaan varmistettua, että lämpötila pysyy vakiona mittauksen aikana sekä mittausten välillä. Huoneenlämpötilan muutoksia voidaan pyrkiä ehkäisemään lämpötilasäätimellä, jollainen tässä työssä suunnitellaan. Huoneenlämpötilan muutokset voivat olla suurusluokaltaan ± 3 °C esimerkiksi eri vuodenaikoina, tai jopa kesken mittauksen, riippuen laboratoriohuoneen lämpötilasäädön riittävydestä. Nyt kehitettävän lämpötilasäätimen tehtävänä olisi kompensoida tämä jäljelle jäävä muutos, jotta kalibroinneissa referenssinä käytettävän LED-valovirtalampun tuottama valovirta olisi joka käyttökerralla sama.

3.4. Lämpötilan vaikutukset

LEDin suorituskyky riippuu hyvin pitkälle sen lämpötilaolosuhteista. Myötäsuunnan jännite ja emittoitu valo riippuvat lämpötilasta ja sähkövirrasta [21]. PN-liitoksen lämpötilan vaikutusta diodin säteilyyn on havainnollistettu kuvassa 7, jossa on kuvattuna Samsungin valmistaman LM516B mallisen LEDin suhteellinen valovirta suhteessa sen PN-liitoksen lämpötilaan.



Kuva 7. Samsungin LM516B:n valovirta PN-liitoksen lämpötilan funktiona. [22]

Yleensä lampun elinikä määritetään suhteellisen valovirran muutoksen perusteella [21]. Tämä tarkoittaa lampun heikentyneen valovirran tasoa suhteessa uuden lampun valovirtaan. LEDien osalta 70 %:n suhteellista valovirtaa tai intensiteettiä pidetään rajana sille, voidaanko ko. LED-tuotetta vielä kutsua toimintakykyiseksi [23]. Tämän

alapuolella laite voi vielä näennäisesti toimia ja tuottaa valoa, mutta sitä pidetään virallisesti liian himmeänä luokiteltavaksi toimivaksi laitteeksi.

4. Standardilampun lämpötilasäätö

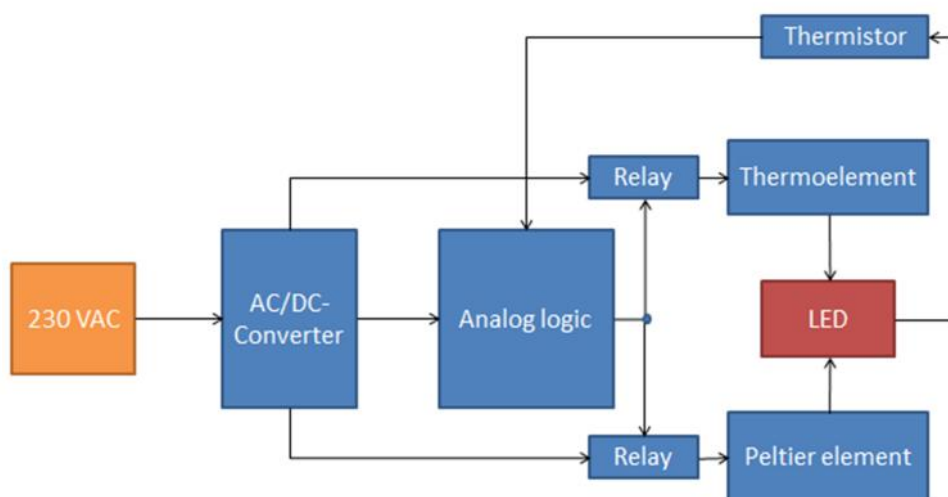
LEDiä lämpötila ei vaikuta ainoastaan LEDin PN-liitoksen elinikään. Se vaikuttaa myös LEDin säteilemän valon voimakkuuteen ja spektrin muotoon. Mitä kuumempi LED on, sitä himmeämmin se säteilee [16]. Lämpötilan muutos vaikuttaa säteilyn voimakkuuden lisäksi myös sen spektriin [20]. Fotometrian mittauksissa LEDin on toimittava tietyssä tunnetussa lämpötilassa, jotta eri mittaukset ovat vertailukelpoisia keskenään ja referenssinä käytettävän LED-valovirtalampun tuottama valovirta on lähes vakio joka käyttökerralla. LEDin sisäinen lämpeneminen asettaa lämpötilan lopulta tiettyyn stabiiliin pisteeseen. Tästä ei koidu ongelmaa, mikäli mittaukset aloitetaan vasta lämpötilan stabiloitumisen jälkeen. Ongelmaksi muodostuu LEDiä ympäröivän ilman lämpötila mittauksen aikana, tai eri mittauspäivinä. Tähän voivat vaikuttaa esimerkiksi ulkoilman lämpötila, huoneen ilmanvaihto tai ilmastointi ja käytössä olevien laitteiden lukumäärä, koska myös ne lämmittävät huonetta. Ympäristön ja integroivan pallon sisäilman lämpötilan vaihtelu vaikuttaa siis myös lämpötilaan, johon LED-valovirtalampussa käytettävien LEDien sisäinen lämpötila stabiloituu. Näin ollen lämpötilasäätimen tehtävä on kompensoida LED-lampun ympäristössä tapahtuvien muutamien asteiden suuruiset muutokset ja asettaa LEDien sisäiset lämpötilat joka käyttökerralla saman suuruisiksi.

LED-lampun lämpötilaan vaikuttaa useita eri asioita. Ensinnäkin LED-komponentin kotelon muoto vaikuttaa lämpenemiseen. Toisin kuin hehkulamput, mitkä säteilevät suurimman osan lämmöstä pois, LEDien tuottama lämpö ei poistu LEDistä säteilemällä, vaan se tulee johtaa LED-komponentista pois termisellä kontaktilla. Tätä varten komponenteissa on usein lämmönsiirtolevy LEDin takapinnassa, joka mahdollistaa lämmön johtumisen [16]. Toinen vaikuttava tekijä on komponentin liitos muuhun piiriin. Anodi ja katodi ovat sähköisiä liitoksia, jotka tuottavat lämpöä [16]. Osa LEDin lämmöstä johtuukin pois LEDistä sen johtimia pitkin. Sähköiset liitokset kuljettavat lämpöä komponenttiin piiristä tai komponentista piiriin. Komponenttien datalehdet ilmoittavat yleensä sen junction-to-board lämpövastuksen, lämpötilariippuvuuden sekä maksimilämpötilarajat [21].

LED-komponentista voidaan poistaa lämpöä usealla eri menetelmällä. Perusperiaate lämmön poistamiseen on kuitenkin kaikilla sama, lämpöenergia on siirrettävä komponentin ulkopuolelle. Siirtäminen voidaan tehdä johtamalla, johon voidaan käyttää edellä mainittuja lämmönsiirtolevyjä tai jäähdytysriipoja. Yksi vaihtoehto on korvata

komponentin pinnalla olevaa ilmaa viileämmällä. Kaikilla eri menetelmillä oleellisin tekijä on jäähdytuspinta-ala. Ilma on huono lämmönjohde, jonka vuoksi se vaatii suuremman pinta-alan [16].

Ulkoisen lämpötilan muutosten vaikutuksien eliminoimiseksi LED:in lämpötilaa on säädettävä. Käytännössä lämpötilansäätö tarkoittaa piirilevyn tai jäähdytyslementin lämpötilasäätöä, jolla LED-komponentti sijaitsee. Vaihtoehtoina lämpötilasäädölle ovat rakenteen jäähdytys, lämmitys tai näiden yhdistelmä. Jokainen vaihtoehto tarvitsee jonkinlaisen takaisinkytkennän lämpötila-anturilta, jotta tasainen lämpötila on mahdollista ylläpitää. AC-käyttöisen LED-valovirtalampun lämpötilansäädön peruseriaate on esitetty lohkokaaviossa kuvassa 8.



Kuva 8. LED-standardilampun lämpötilasäädön peruseriaate.

4.1. Testattavat lamput

Tässä työssä LEDien lämpötilasäädön rakentamiseen ja testaamiseen oli käytettävissä kaksi erilaista lamppua: OSRAM LED Superstar ADV Globe G95 60 E27 9W ja PHILIPS LED G95 Globe E27 13.5W LED-lampun. Myöhemmin lamputa puhuttaessa käytetään vain nimityksiä Osramin ja Philipsin lamppu. Lampun on esitetty kuvassa 9. Molemmat lamput ovat E27-kantaisia, mikä on yksi LED-valovirtalampun vaatimuksista. Osram on ulkomitoiltaan 149 x 95 mm ja Philips 150 x 93 mm. Molemmat mitat sisältävät kannat.



Kuva 9. Tutkittavat LED-lamput, vasemmalla Osram, oikealla Philips.

Molempien LED-lamppujen rakenne ja toimintaperiaate on samankaltainen. E27-kantaan on integroitu LEDejä ajava AC/DC-konvertteri. Tämän jälkeen on metallinen aluslevy, johon on kiinnitetty LED-piirilevy. Osramin lampussa on 9 LED-diodia ja Philipsissä 32. Lopuksi päällimmäisenä on lampun kupu, joka muodostaa diffuusin ympärisäteilevän valojakauman. Erona lampuissa on, että Osramin lampun AC/DC-konvertteri on peitetty valkoisella massalla. Massalla peitetty piiri näkyy kuvassa 10.



Kuva 10. Osramin massalla peitetty AC/DC-konvertteri.

Osramin lampun valkoisen massan vuoksi tässä työssä päädyttiin käyttämään Philipsin lamppua. Sen liitännät ovat myös selkeämmin esillä ja helpompikäyttöisiä. Philipsin lampussa on käytetty liittimiä, kun taas Osramin lampussa liitännät on tehty juotetuilla johtimilla. Purettu Philipsin lamppu on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. PHILIPS LED G95 Globe E27 13.5W LED-lamppu. Edessä vasemmalta oikealle: E27-kanta johon liitettynä AC/DC-konvertteri, metallinen aluslevy ja LED-piiri. Takana on lampun kupu.

Philipsin lampun AC/DC-konvertterina toimii hakkuriteholähde joka muuttaa 230 VAC verkkovirran yleismittarilla mitattuna 314 VDC:ksi, joka syötetään LED-piirille. Lisäksi piirissä on termistori, joka viittaa lämpötilan mittaukseen. Oletettavasti tämä on turvallisuustekijä, jolla virta katkaistaan lämpötilan noustessa liian kuumaksi. LED-piirissä LED-diodit on oletettavasti kytketty sarjaan, jolloin yksittäisen diodin jännitteen pudostus on noin 10 voltia. Kukin LED-komponenteista saattaa sisältää vielä useamman kuin yhden LED-komponentin, mitkä on myös keskenään kytketty sarjaan. Tyypillinen valkoisessa LEDissä käytetyn sinisen LEDin kynnysjännite on n. 3-4 voltia.

4.2. Lämmityselementti

Yksi vaihtoehto lämpötilasäätöön on LEDin lämmittäminen. Elektronisesti tämä on yksinkertaista toteuttaa esim. lämpövastuksella. Lämpövastus on erikoissuunniteltu tehovastus, minkä tarkoitus on muuttaa sähkövirtaa lämmöksi. Toinen mahdollisuus on PTC-lämmityselementin käyttäminen. Nämä molemmat menetelmät ovat kuitenkin käytännöllisempiä suurempien lämpötilaerojen säätämiseen suuremmissa sovelluskohteissa. Koska standardilampun LED-piiri on hyvin pieni ja huoneenlämpötilan vaihtelut muutaman asteen luokkaa, voidaan lämmityselementtinä käyttää myöskin aivan tavallista elektroniikan vastuskomponenttia. Kun vastuksen läpi

kulkee sähkövirta, se muuttaa sähkötehoa lämmöksi. Lämmitysteho, P , saadaan johdettua Ohmin lain avulla muotoon,

$$P = UI = \frac{U^2}{R}, \quad (8)$$

jossa U on jännite, I on sähkövirta vastuksen lävitse ja R on vastuksen resistanssi. Pätötehon yksikkö on watti [W].

Tarvittavan lämmitystehon suuruusluokka voidaan laskea termodynamiikan perusteella. Tästä saadun suuruusluokan perusteella sopivin lämmitysteho löydetään testaamalla eri vastuksia ja mittaamalla piirin lämpenemistä. Karkean lämmitystehon arvioimiseksi on tunnettava lämmitettävän kappaleen ominaislämpökapasiteetti, c_{th} , sekä massa, m . Tarvittava energiamäärä tietyn lämpötilamuutoksen, ΔT , aikaan saamiseksi voidaan laskea kaavalla,

$$\Delta E = c_{th} m \Delta T. \quad (9)$$

Philipsin lampun LED-piirilevyn ominaislämpökapasiteetiksi voidaan arvioida 0,6 kJ/(K·kg) ja massaksi 50 g. Jos lämpötilamuutoksen halutaan olevan 5 astetta vallitsevan huoneenlämmön yläpuolelle, tarvittava energiamäärä on 0,15 kJ. Lämmitysteho voidaan laskea tarvittavasta energiamäärästä käyttämällä kaavaa,

$$P = \frac{E}{t}, \quad (10)$$

jossa t on lämmitykseen käytettävä aika. LED-piirilevyn lämmittämiseen 5 astetta huoneenlämpötilan yläpuolelle 10 s lämmitysajalla tarvittava teho olisi karkeasti 15 W tai 30 s lämmitysajalla 5 W. Kaavan 8 mukaisesti 5 W teho saadaan aikaiseksi esimerkiksi 15 V jännitteellä ja 45 Ω vastuksella tai 20 V jännitteellä ja 80 Ω vastuksella.

Lämmönjohtavuus, λ_{th} , kuvastaa kuinka hyvin kyseinen kappale johtaa lämpöä. Suuremmalla lämmönjohtavuuden arvolla lämpöä johtuu helpommin kuin pienemmällä arvolla. Lämmönjohtavuus kertoo lämpötehon siirtymisen poikkipinta-alaa ja tiettyä kappaleessa olevaa lämpötilagradienttia, dT/dx , kohti. Lämmönjohtavuuden yksikkö on W/(K·m) ja se voidaan laskea kaavalla,

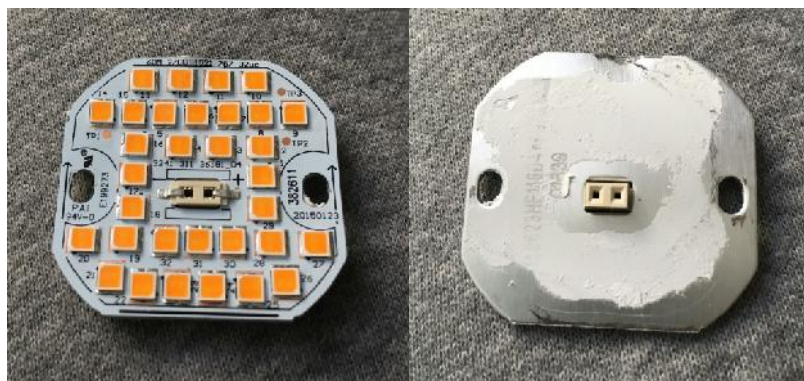
$$\lambda_{th} = \frac{P}{A dT/dx}. \quad (11)$$

Tunnetun lämmönjohtavuuden avulla voidaan laskea kappaleen lämpöresistanssi, R_{th} , joka kuvaa kappaleen päiden välille muodostuvaa lämpötilaeroa, kun lämmitys tapahtuu kappaleen toiselta puolelta. Lämpöresistanssi lasketaan kaavalla,

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda_{th}A}, \quad (12)$$

jossa l on kappaleen pituus.

Eri materiaalien lämmönjohtavuudelle on löydettävissä helposti arvoja kirjallisuudesta. Piirilevyn lämmittämisen kannalta oleellisimpia arvoja ovat FR4:n ja kuparin lämmönjohtavuudet. FR4 on yleinen piirilevyjen valmistusmateriaali, joka koostuu lasikuidusta ja epoksista. Sen lämmönjohtavuus on välillä 0,3 – 0,8 W/(K·m). Kuparia käytetään piirilevyn johdevedoissa ja sen lämmönjohtavuus on noin 390 W/(K·m). Philipsin lampun LED-piirilevy on kooltaan 35 mm x 33 mm. Mikäli kuparivedon paksuus on 35 µm ja leveys 0,5 mm, on sen lämpöresistanssi piirilevyn toisesta reunasta toiseen reunaan kuparivetoa pitkin noin 513 K/W. Puolestaan 1,57 mm paksuista FR4 piirilevyä pitkin lämpöresistanssi olisi levyn reunasta reunaan noin 844 - 2251 K/W riippuen käytetystä FR4:n lämmönjohtavuuden arvosta. Näistä arvoista voidaan päätellä, että piirilevyyn johdettava lämmitysteho välittyy lähinnä kuparivetojen avulla. Tämä tarkoittaa, että koko piirilevyn ei tarvitse lämmitä haluttuun lämpötilaan, kunhan lämpöä välittyy kuparivetojen johdolla tarpeeksi LED-komponenteille. Kriittinen tekijä tässä kokonaisuudessa on, että eri LED-komponenttien lämmitys tapahtuu yhtäläisellä teholla, jolloin ne pysyvät keskenään samassa lämpötilassa. Näin ollen lämmityselementtejä tulisi olla tasaisesti lämmitettävällä alueella, eikä vain esimerkiksi yhdessä reunassa. Parhaassa tapauksessa piirilevyn jokaisen LED-komponentin kohdalla olisi lämmityselementti. Tällöin lämpötilasäädöstä saadaan myös mahdollisimman nopea, koska lämmityselementti sijaitsisi kunkin LED-komponentin välittömällä lähietäisyydellä. Philipsin lampun käyttämä LED-piirilevy on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Philipsin LED-lampun LED-piirilevy vasemmalla edestä kuvattuna ja oikealla takaa kuvattuna. Piirilevy on kooltaan 35 mm x 33 mm ja sisältää 32 LED-komponenttia.

Philipsin lampun LED-piirilevyn kuparivedot ovat peitetty metallisella kuorella. Näin ollen metallikuorta on mahdollista lämmittää suoralla kontaktilla ilman riskiä oikosuluista. Metallinen kuori todennäköisesti tasoittaa lämpövuota piirille, jolloin lämmityskohtia ei välttämättä tarvita niin montaa kuin LED-komponentteja on. Lämmityselementiksi voidaan testata esimerkiksi vastuksia, joiden metallirungot asetetaan LED-piirilevyn takaosan metallikuorta vasten.

4.2.1. Lämpövastuksien mittaus

Ensimmäisenä testinä lämpövastuksille, oli niiden lämmityskapasiteetin tutkiminen. Ensimmäinen mittaus tehtiin ilman, että LED-piiriä oli kytketty päälle. Kappaleen 4.2 laskelmien perusteella testattaviksi resistanssiarvoiksi valittiin 20, 75, 100, 500 ja 1000 ohmia. Mittauksen tavoitteena oli löytää sopivimmat vastusarvot jännitteille välillä 5 – 25 volttia. Valintaa ei haluttu rajata tietylle jännitteelle, sillä laitteen käyttämää jännitettä ei oltu vielä päätetty. Tältä väliltä valittiin kuitenkin vain yleisimmät käytössä olevat jännitetasot: 5, 10, 12, 15 ja 27 volttia. Testatuista vastuksista on esitetty tarkempia tietoja taulukossa 1.

Resistanssi	Toleranssi	Tehonkesto	Kotelo	Valmistaja
20 Ω			TO-220	Caddock
75 Ω		30 W	TO-220	Vishay
100 Ω	5 %	50 W	TO-220	Vishay
500 Ω	1 %	30 W	TO-220	Caddock
1 k Ω		20 W	TO-220	Vishay

Taulukko 1. LEDien lämpötilan säätöä varten testatut vastukset.

Kaikkien vastuksien kotelotyyppiksi oli valittu TO-220. Kyseinen kotelotyyppi valittiin, koska se sisältää rungon, jonka avulla komponentti luovuttaa tuottamaansa lämpöä ympäristöönsä. Vastuksien rungot asetettiin LED-piiriä vasten, jolloin vastuksen tuottama lämpö välittyi suoraan lämmitettävään LED-piiriin. Vastuksen kiinnitys tehtiin tässä vaiheessa teipillä. Vastukselle syötettiin virtaa Mastechin HY3005D DC-virtalähteellä. LED-piirinlevyn lämpötilaa mitattiin Agilentin 34410A yleismittarilla, johon oli kiinnitettynä mittapääksi PT-100 lämpötila-anturi. Lämpötila-anturi pystytettiin sijoittamaan suoraan LED-piirilevyn reunan läheisyydessä olevaan ruuvivierekkään. Lämmittävä vastus kiinnitettiin lämmitettävän piirilevyn keskelle. Mittauksen ajaksi LED-piirilevy ja siihen kiinnitetty vastus peitettiin lasilla, jolloin mittausolosuhteet saatiin lähemmäksi lampun kuvun sisällä vallitsevia olosuhteita ehkäisemällä ilman kierto piirilevyn ympärillä. Mittausjärjestelyä on esitetty tarkemmin kuvassa 13.



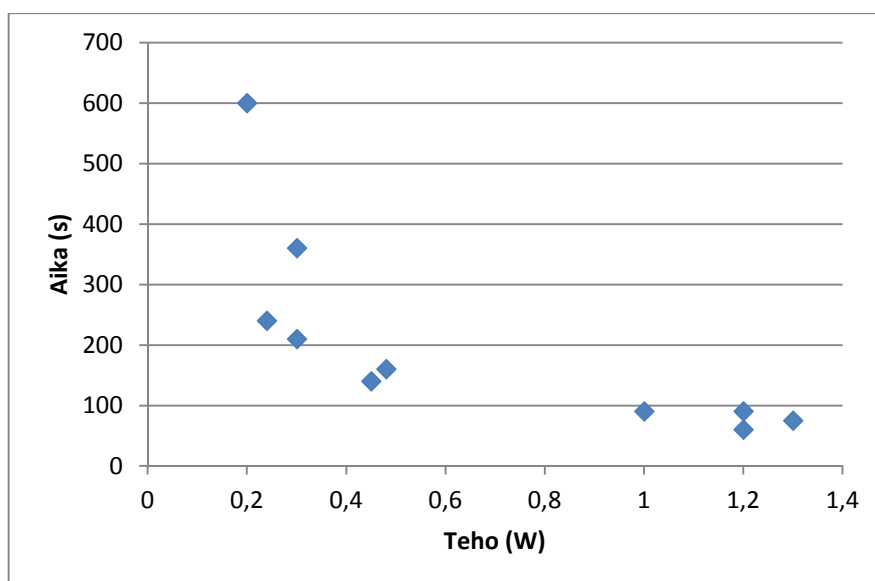
Kuva 13. TO-220 koteloinen vastus on kiinnitetty teipillä lämmitettävään piirilevyyn (vasemmalla). Systeemi on peitetty lasilla ilman kiertämisen ehkäisemiseksi (oikealla).

Mittauksissa pyrittiin löytämään sopivimmat jännite-resistanssi yhdistelmät, jolla piirilevyä saatiin lämmitettyä tietty lämpötila tietyn ajan puitteissa. Raja-arvoksi asetettiin 5 asteen lämmitys vallitsevan huoneenlämmön yläpuolelle. Käyttökelpoiset resistanssin ja jännitteen yhdistelmät on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Piirilevyn lämmityksen mittaustulokset. Piirilevyä lämmitettiin niin kauan kullakin vastuksella, että piirilevyn lämpötilan muutokseksi saatiin 5 °C.

Resistanssi (Ω)	Jännite (V)	Virta (A)	Teho (W)	Keskimääräinen aika (min)
20	2,5	0,12	0,3	~6
20	5	0,24	1,2	~1,5
75	5	0,06	0,3	~3,5
75	10	0,13	1,3	~1,25
100	10	0,1	1,0	~1,5
500	10	0,02	0,2	~10
500	12	0,02	0,24	~4
500	15	0,03	0,45	~2,33
500	24	0,05	1,2	~1
1000	24	0,02	0,48	~2,66

Tuloksista voidaan tehdä hyvin karkea kuvaaja, joka esitettynä kuvassa 14. Tästä nähdään, että 5 asteen lämmitykseen kuluva aika on karkeasti kääntäen verrannollinen lämmitystehon neliöön. Tätä voidaan hyväksikäyttää määrittäessä lopullisia lämmitykseen käytettäviä vastusarvoja. Tässä esitetyt mittaukset tehtiin huoneenlämmössä käyttämättä LED-lampun elektroniikka, koska lähes vastaava lämmitysteho ja sen aikaansaama lämpötilanmuutos voidaan saada aikaan myös lampun toimiessa, tässä testin kuitenkin ollessa turvallisemmin toteutettavissa, kun verkkosähköä ei levyyn ollut kytkettynä. Käytännössä lampun elektroniikan toimiessa ja LED-piirilevyn ollessa korkeammassa lämpötilassa on systeemin terminen tila hieman toisenlainen, mutta tehty testi antaa tulokset varsin riittävällä tarkkuudella, unohtamatta mittauksen turvallisuutta.



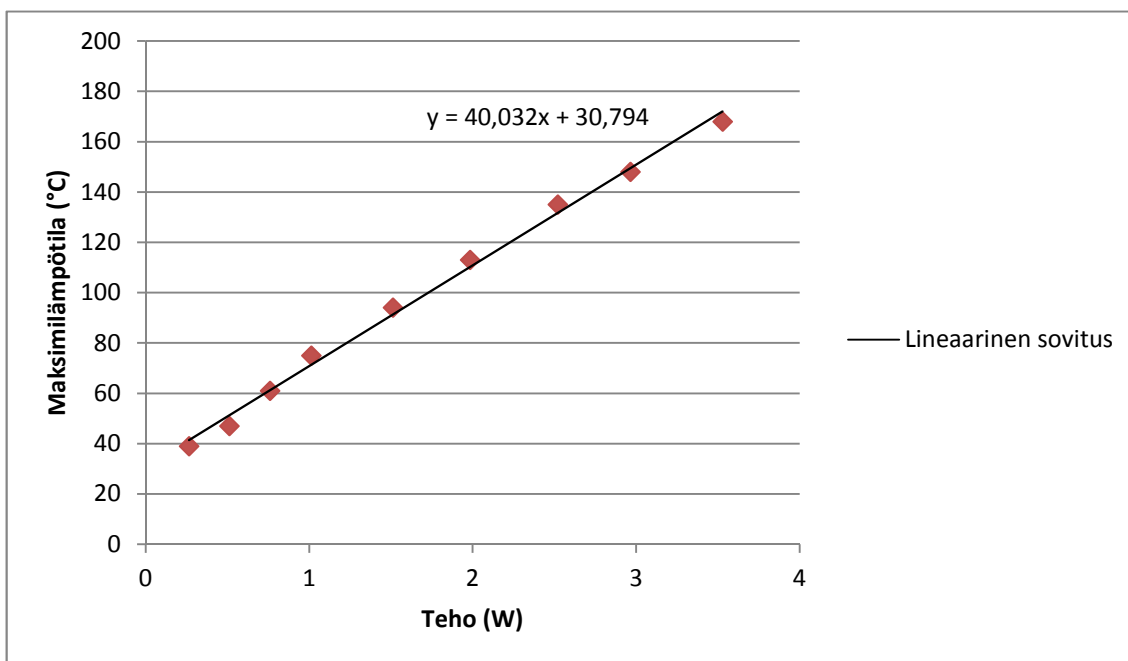
Kuva 14. Taulukon 2 tulokset kuvaajana.

Vastaavalla mittaussuunnitelmällä mitattiin myös maksimilämpötila, johon vastuksen runko lämpenee eri tehoilla. Tässä testissä käytettiin pelkkää 20 Ω :n vastusta, jotta voitiin käyttää pienempiä jännitearvoja. Mittaustulokset rajattiin tuloksiin, joissa lämmitysteho oli alle 3,5 W. Tämä johtuu suuremmilla tehoilla saavutetuista suurista lämpötiloista, jotka aiheuttivat erilaisia ongelmia mittaukselle. 3,7 W teholla lämmitettäessä teippi, jolla lämpötila-anturi oli kiinnitetty alkoi sulamaan, noin 200 °C-asteen lämpötilassa, jolloin mittaus ei enää ollut tarkka anturin kontaktin vastuksen runkoon ollessa heikko. Teipin liiman sulamista kompensoitiin tukemalla anturi sekä vastus pöytää vasten muovikahvaisella ruuvimeisselillä. 7,2 W teholla saavutettiin lähes 300 °C-asteen lämpötila, mutta tässä vaiheessa sekä vastusta tukeva muovikahva, että jännitelähteen johtimien kiinnikkeet sulivat kiinni vastukseen. Mittaustulokset on esitetty Taulukossa 3. Kuvassa 15 on esitetty taulukon 3 tulokset, niin että pois on jätetty yli 3,5 W tehon mittaukset. Kuvaajasta nähdään, että saavutettu maksimilämpötila on suoraan verrannollinen tehoon.

Taulukko 3. Vastuksen rungon saavuttama maksimilämpötila eri lämmitystehoilla.

Suluissa olevat tulokset arvioita.

Jännite (V)	Teho (W)	T_max (°C)
2,3	0,26	39
3,2	0,51	47
3,9	0,76	61
4,5	1,01	75
5,5	1,51	94
6,3	1,98	113
7,1	2,52	135
7,7	2,96	148
8,4	3,53	168
8,9	3,96	(yli 200)
12	7,20	(yli 300)

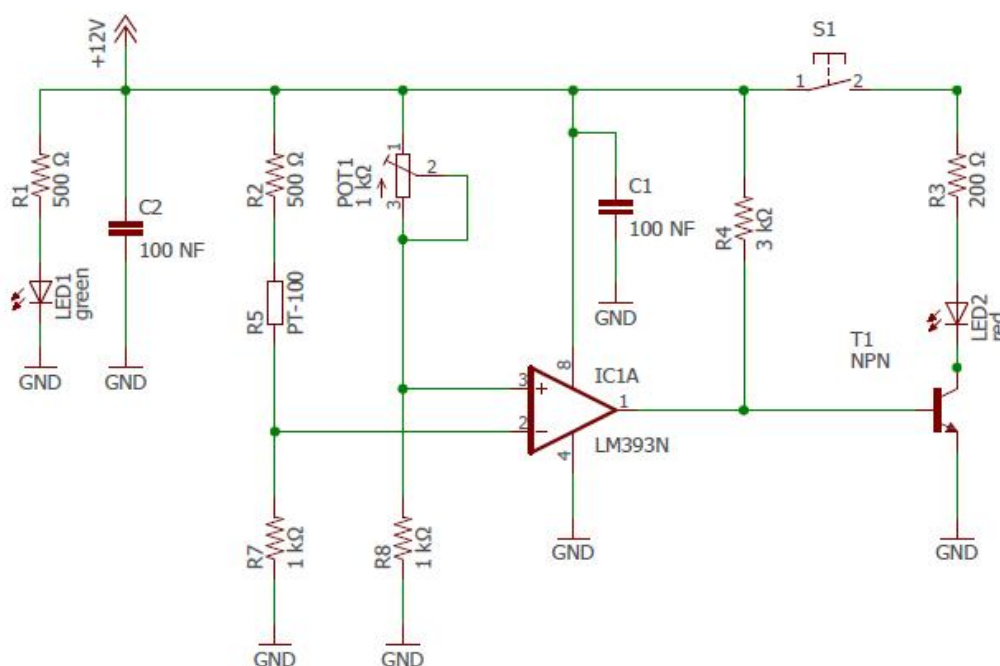


Kuva 15. Vastuksen rungon maksimilämpötila on suoraan verrannollinen lämmitystehtoon.

4.2.2 Lämpövastuksien ohjaus

Lämmitykseen käytettävät vastukset tarvitsevat takaisinkytkennän, jonka avulla ohjataan milloin vastuksien läpi kulkee virtaa ja milloin ei. Käytännössä tämä tarkoittaa, että lämpötilan ollessa liian matala, lämmitys kytketään päälle ja saavutettuaan tavoitelämpötilan, lämmitys kytketään pois päältä. Takaisinkytkentä tarkoittaa järjestelmän lähtösignaalin ohjaamista takaisin järjestelmän tulosignaaliksi. Käytännössä siis silmukkaa, jonka avulla järjestelmä ohjaa toimintaansa. Käytännössä tässä tapauksessa tämä tarkoittaa lämpötila-anturia, jonka signaalin mukaan päätetään, jatketaanko lämmitystä vai katkaistaanko se.

Ensimmäinen prototyyppi lämmityspiiristä perustui yksinkertaiseen komparaattoriin, joka on esitetty kuvassa 16.



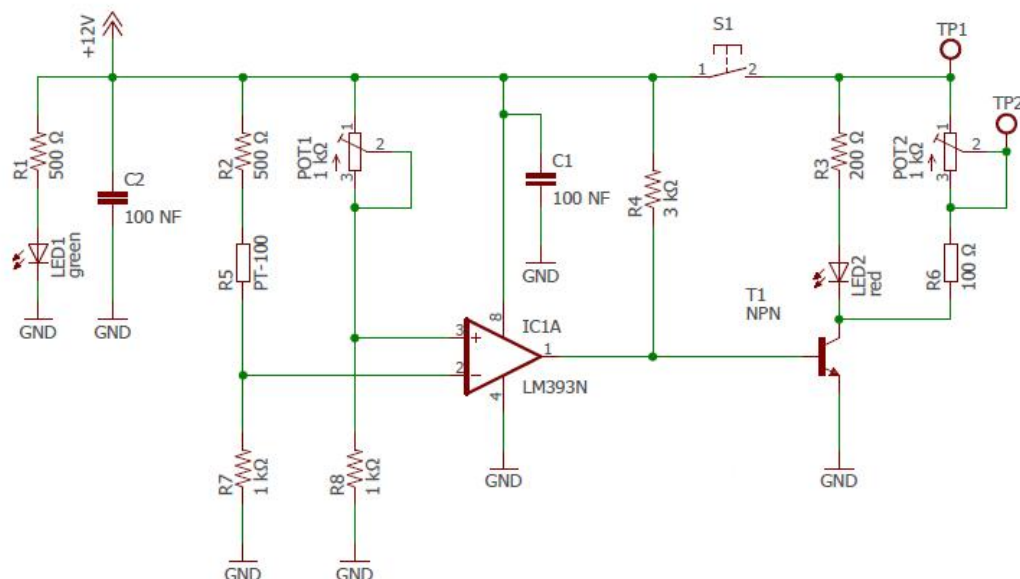
Kuva 16. Ensimmäinen lämmityspiirin prototyyppi.

Tässä lämmitysvastusta oli demonstroitu punaisella LED-valolla, LED2, joka antoi visuaalisen signaalin, milloin lämmitys on päällä tai pois päältä. Kytkennän perusideana on, että komparaattori, IC1A, seuraa positiivisessa sisääntulossa PT-100, R5, lämpötila-anturin, sarjassa 500 Ω:n vastuksen, R2, kanssa, ja 1 kΩ:n vastuksen, R7, muodostaman jännitteenjakajan jännitettä. Komparaattorin negatiivinen sisääntulo puolestaan seuraa 1 kΩ:n trimmeripotentimetrin, POT1, sekä vastuksen, R8, muodostamaa jännitettä. Mikäli positiivisen puolen jännite on suurempi kuin negatiivisen, komparaattorin ulostulojännite pitäisi olla lähellä positiivista käyttöjännitettä, eli noin 12 V. Puolestaan

mikäli negatiivisen sisääntulon jännite on korkeampi, komparaattorin ulostulojännite on lähellä negatiivista käyttöjännitettä, eli tässä tapauksessa maatasoa. Komparaattorin negatiivisen sisääntulon jännite on vakio ja sitä voidaan säätää potentiometrin avulla. Tätä kutsutaan kynnysjännitteeksi. Sen arvoa säädettäessä käytännössä säädetään lämpötilatasoa, jota järjestelmällä halutaan ylläpitää. PT-100-anturi on periaatteessa lämpötilavastus, jonka resistanssi on 0 °C asteessa 100 Ω:a [24]. Lämpötilan noustessa resistanssi nousee.

Komparaattorina piirissä on käytetty Fairchildin LM393N-komparaattoria. Sen lähdössä on niin kutsuttu avokollektoritransistori. Tämän ansiosta komparaattori voi vetää jännitettä alaspäin lähelle komparaattorin negatiivista käyttöjännitettä, eli tässä tapauksessa maatasoa. Ulostulossa on 3 kΩ:n ylös vetovastus, R4, käyttöjännitteeseen. Tämän tarkoituksena on nostaa ulostulo lähelle käyttöjännitettä kun komparaattori ei laske sitä tarkoituksella maatasoon. Tämän jälkeen piiriin on kytketty NPN-bipolaaritransistori, T1. NPN-bipolaaritransistoriparia käytetään tässä tapauksessa kytkimenä, jonka tarkoitus on kytkeä lämmitysvastuksen virta tarpeen mukaan päälle ja pois. Transistoria kytketään tällöin suljetusta tilasta (virta ei kulje) kyllästystilaan (virta kulkee).

Kun piirin toiminta oli testattu punaisen LED-valon avulla, siihen lisättiin 100 Ω:n lämmitysvastus, R6. Lämmitysvastuksen kanssa sarjaan on kytkettynä 1 kΩ:n trimmeripotenttiometri, POT2, jonka avulla voidaan hienosäätää lämmitysvastuksen tehoa. Sen resistanssi voidaan mitata testipisteistä TP1 ja TP2, kun piiriin ei ole kytkettynä virtaa. Keinukytkimellä S1 voidaan asettaa lämmitysominaisuus käyttöön tai pois käytöstä. Punainen LED, (LED2 kuvassa 16), ilmaisee milloin lämmitys on päällä. Koko lämmityspiiri on kuvattuna kuvassa 17.



Kuva 17. Lämmityspiiri.

4.3. Jäähdytyslementti

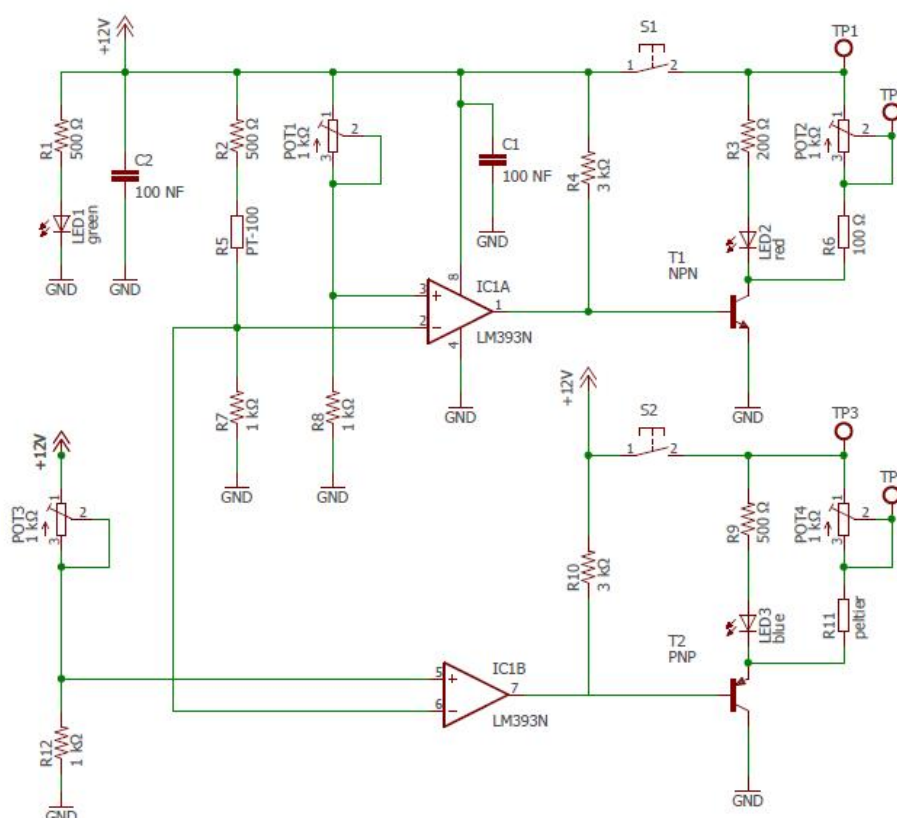
LED-piirin jäähdyttämiseen käytetään European Thermodynamicsin valmistamaa APH-127-10-25-S –Peltier-elementtiä, joka on kooltaan 30 mm leveä, 30 mm korkea ja 4,5 mm paksu [25]. Peltier-elementin toiminta perustuu lämpösähköiseen ilmiöön, jossa sähkövirta aiheuttaa lämpötilaeron kahden eri materiaalia olevan pinnan välille, joista elementti koostuu.

Peltier-elementin toiminnan kannalta on hyvin oleellista, että lämpenevän puolen lämpö saadaan johdettua pois elementiltä, muuten tietyssä pisteessä jäähdytysteho lakkaa kun lämpö ei pääse enää siirtymään jäähdyttävältä elementiltä lämpenevälle elementille. Tätä varten Peltier-elementeissä käytetään usein jäähdytysripoja sekä tuulettimia. Tässä tapauksessa jäähdytyslementin on oltava mahdollisimman pieni, joten tuuletinta ei edes harkittu ja jäähdytysripojen on oltava mahdollisimman pieniä. Peltier-elementin toimintaa testattiin kytkemällä elementti suoraan virtalähteeseen ja mittaamalla jäähdytystehoa LED-piiriin. Ilman minkäänlaista lämmönsiirtoa elementiltä, saatiin aikaiseksi muutaman asteen lämpötilan alennus. Käyttämällä täydellisesti liioitellun kokoista jäähdytysripaa, LED-piirin lämpötilaa saatiin laskettua yli 10 °C. Testattavana oli myös 20x20 mm ripoja, joiden vaikutus ei juurikaan eronnut siitä, että niitä ei olisi ollut ollenkaan kiinnitettynä elementtiin.

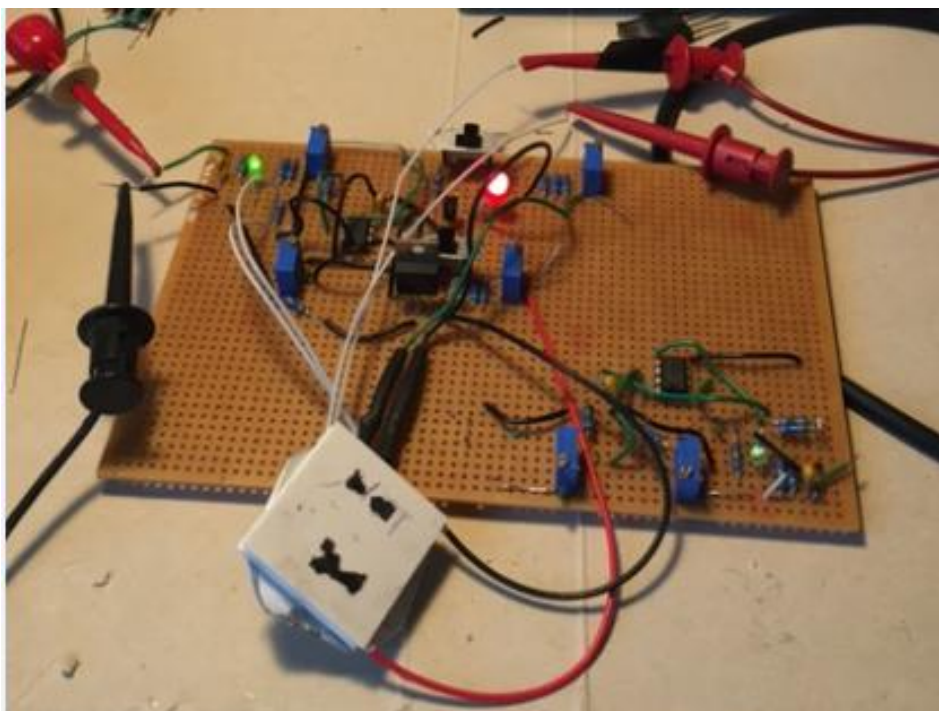
4.3.1. Jäähdytyslementin ohjaus

Jäähdytyslementin ohjaus tapahtui peruseriaatteeltaan samalla tavalla, kuin lämmituselementinkin ohjaus. Trimmeripotentiometrilla, POT3, säädetään missä

lämpötilassa jäähdytys alkaa. Käyttämällä kahta eri säätöä lämmitykselle sekä jäähdytykselle mahdollistaa pienen hystereesin asettamisen, jolloin lähelle tavoitelämpötilaa voidaan jättää pieni alue, jolloin piiriä ei lämmitetä eikä myöskään jäähdytetä. NPN-transistorin sijasta jäähdytyspuolella käytetään PNP-transistoria, T2. Tämä eroaa NPN-transistorista siinä, että aktiivisena (jännite kannalla) se ei johda virtaa lävitsensä. Tämän vuoksi komparaattorin sisäänmenot on kytketty samoin kun lämmityspuolella, vaikka toiminta on päinvastainen. Peltier-elementin tehoa voidaan säätää trimmeripotentiometrillä, POT4 ja sen resistanssi voidaan mitata testipisteistä TP3 ja TP4. Jäähdytyspuoli voidaan ottaa käyttöön ja pois käytöstä keinukytkimellä S2. Sininen LED, LED3, ilmaisee milloin jäähdytys on päällä. Koko piiri on kuvattu kuvissa 18 ja 19.



Kuva 18. Lämmitys- sekä jäähdytyspiiri.



Kuva 19. lämpötilasäädinpiiri. Vihreä LED ilmaisee, että piiriin on kytketty virta ja punainen LED puolestaa, että lämmitys on kyseisellä hetkellä aktiivisena.

5. Mittaustulokset

Lämpötilasäätimen testausta varten lämmitysvastus, Peltier-elementti, säätimen PT-100-anturi sekä ulkoisen lämpötilamittarin PT-100-anturi kiinnitettiin LED-piirilevyn eri puolille. Kiinnitys tehtiin Loctiten pikaliimalla. Ulkoinen lämpötilamittari oli kytkettynä Agilentin 34410A yleismittariin.

Ensimmäisessä testissä käytettiin pelkkää säätöpiirin lämmitysominaisuutta asettamalla kytkin S2 avoimeksi. Lämmityksen päälle ja pois kytkeytymisen raja-arvoksi asetettiin 29,40 °C. Lämmityksen tehon hienosäätöpotentiometrin, POT2, arvon ollessa nollassa, eli kun 100 Ω:n lämmitysvastukselle syötettiin 12 V:n käyttöjännite, päästiin 0,6 °C:n tarkkuuteen. Tällöin Ohmin laista johdettuna, lämmitys tapahtui 1,44 W:n teholla. Suurin muutos tavoitelämpötilaan verrattuna aiheutui, kun lämmitys kytkeytyi pois päältä, mutta vastus oli yhä lämmin ja jatkoi näin ollen lämmittämistä vielä hetken virran pois kytkeytymisen jälkeen. Kun vastus jäähdyi ja sen jälkeen LED-piirin lämpötila putosi alle lämmitysrajan, lämpötilan jäähtyminen loppui erittäin nopeasti lämmityksen kytkeytyessä päälle.

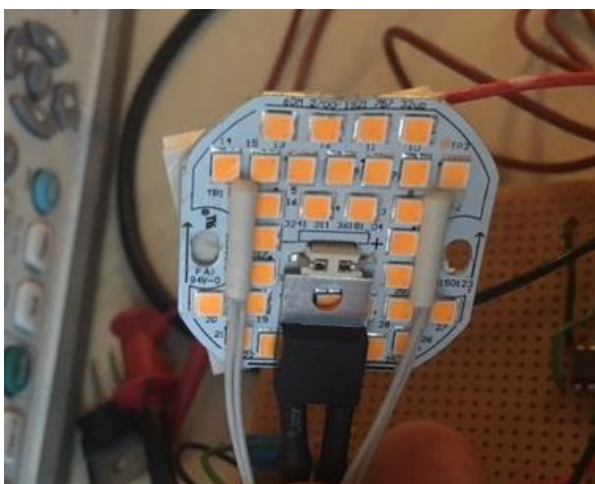
Asettamalla POT2 arvoon 20 Ω, teho näin ollen 1,20 W sekä tavoitelämpötila 29,60 °C:n päästiin jopa 0,4 °C:n tarkkuuteen. Tässä merkittävimpiä tekijänä lämpötilan hyvälle tarkkuudelle on lämmitystehon hiipuminen vaaditun lämpötilan tienoilla. Näin ollen lämpötilan kasvu tavoitelämpötilan tietämillä oli hidasta, jolloin vastus ei enää jatkanut lämmittämistä pitkälle yli tavoitearvon.

Toinen testi tehtiin käyttämällä pelkkää säätöpiirin jäähdytysominaisuutta. Tässä ongelmaksi muodostui heti puutteellinen lämmönjohtaminen Peltier-elementiltä. Sovelluksen käyttötarkoituksen kannalta järkevän kokoisilla jäähdytysselementeillä systeemin jäähdytin kuumeni nopeasti siihen pisteeseen, että jäähdytystä ei enää tapahtunut. Käyttämällä puolestaan liioitellun suurta jäähdytysripaa, halkaisijaltaan 10 cm ja korkaudeltaan 3 cm, saatiin lämpötila pysymään 0,6 °C:n sisällä tavoitelämpötilan ollessa 20,0 °C. POT4 arvoksi oli asetettu 40 Ω:a, jotta virrankulutus ei olisi niin suuri. Tässä mittauksessa suurimman epätarkkuuden aiheutti komparaattorin suuri hystereesi. Jäähdytys kytkeytyi pois päältä huomattavasti alemmassa lämpötilassa kuin missä se kytkeytyi päälle. Tämä erotus oli noin 0,4 °C. Teoriassa ilman hystereesiä, tarkkuus olisi ollut noin 0,2 °C.

Kolmas ja viimeinen testi tehtiin käyttämällä sekä lämmitys- että jäähdytysominaisuutta. Lämmitys oli säädetty kytkeytymään päälle noin 29,6 °C:ssa ja jäähdytys puolestaan noin 29,8 °C:ssa. POT2 arvoksi oli asetettu 0 Ω ja POT4 40 Ω . Tällä kombinaatiolla piirin lämpötila pysyi jatkuvasti välillä 29,5-30,0 °C.

5.1. Mittaustulosten arviointi

Lämmitin, jäähdytin sekä PT-100 anturit kiinnitettiin LED-piirilevyyn liimalla. Etenkin lämpötila-antureiden kohdalla tämä saattaa aiheuttaa eroja lämmönjohtumiseen piirilevyltä anturiin. Komponenttien liimaus pyrittiin tekemään niiden reunoista, jolloin mahdollisimman paljon paljasta komponenttia jäisi piirilevyä vasten. Kuitenkin liiman koostumuksesta johtuen ei voida sanoa varmasti, ovatko lämpötila-antureiden kontaktit piirilevyyn identtiset. Tämä aiheuttaa eroa mitatun lämpötilan sekä piirin mittaaman lämpötilan välille, joka aiheuttaa suoraan virhettä mittauksiin. Myöskin komponenttien etäisyyksien erot toisiinsa aiheuttavat samanlaista virhettä lämmönjohtavuuden kanssa. Lämpötila-anturien kiinnitys LED-piirilevyyn on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Lämpötila-anturien sekä lämmitysvastuksen kiinnitys LED-piirilevyyn.

6. Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin LED-standardilampun lämpötilasäätöä fotometrian kalibrointeja varten. Lämpötilansäädöllä pyrittiin ehkäisemään huoneenlämpötilan vaihtelun aiheuttama eroavaisuus LED-lampun valovirtaan sekä spektriin eri mittauksien välillä. Parhaimmillaan tavoitelämpötila saatiin ylläpidettyä 0,5 °C:n tarkkuudella. Tämä on huomattavasti parempi kuin oletettu ± 3 °C:n vaihtelu ilman lämpötilasäätöä. Tämä tarkkuus saavutettiin menetelmällä, jossa oli yhdistettynä sekä lämmitys- että jäähdytysominaisuus. Jäähdytysmenetelmän käytännön haasteeksi saattaa muodostua jäähdytyselementin lämmönsiirtoon vaadittavan jäähdytysrivan suuri koko ja sen mahdolluttaminen LED-lampun sisälle. Menetelmää voisi käyttää myös ilman jäähdytysriipa käyttämällä pelkkää lämmitystä, jolloin LED-lamppu tulisi lämmittämään huoneenlämpötilan vaihteluvälin yläpuolelle. Tämän menetelmän haittapuolena on kuitenkin pienempi, n. 0,6 °C:n tarkkuus, sekä lampun LEDien nopeampi ikääntyminen johtuen keskimääräistä suuremmasta käyttölämpötilasta. Lämmityksen etuihin lukeutuu kuitenkin vaadittavan lämmitystehon suoraviivainen määrittäminen, sillä lämpövastuksen rungon maksimilämpötila on suoraan verrannollinen käytettävään lämmitystehoon.

Lämpötilasäätöä voidaan parantaa käyttämällä anturien ja LED-piirin välissä parempaa termistä kontaktia ja optimoimalla anturien sijaintia. Etenkin piirin geometrisesti tasaisella lämmittämällä voidaan parantaa tuloksia. Tämä saadaan aikaiseksi lisäämällä yhden lämmitysvastuksen sijasta useita vastuksia piiriin. Kun lämpötilasäädin toteutettaisiin LED-piirin suunnittelun yhteydessä, eikä ulkoisena osana, se voitaisiin integroida suoraan piirilevyyn, jolloin lämmitysvastuksien sijoittaminen olisi huomattavasti helpompaa. Lämpötilasäätö voitaisiin myös toteuttaa digitaalisesti analogisen piirin sijasta. Näin ollen lämmitystehoa voitaisiin säätää eri vaiheissa, jolloin esimerkiksi lähellä tavoitelämpötilaa lämmitysteho olisi pienempi kuin kauempana tavoitelämpötilasta ollessa. Tämä ehkäisisi lämpötilan nousemista tavoitelämpötilan yli ennen kuin lämmitysvastus ehtii jäähtyä.

Koska standardihehkulamppujen aika kalibrointikäytössä tulee väistämättä jossain vaiheessa päätökseen, LED-pohjaisten vaihtoehtojen tutkimista on jatkettava. Vie kuitenkin aikansa, ennen kuin uudet menetelmät ovat valmiita yleisesti hyväksyttäviksi ja standardoitaviksi vaihtoehtoiksi.

Lähteet

- [1] W. McCluney, *Introduction to Radiometry and Photometry*, 2. painos, Artech House, 2014.
- [2] J. C. Zwinkels, E. Ikonen, N. P. Fox, G. Ulm and M. L. Rastello, "Photometry, radiometry and 'the candela': evolution in the classical and quantum world," *Metrologia*, vol. 47, pp. 15-32, 2010.
- [3] D. Schreuder, *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception*, Springer Netherlands, 2008.
- [4] T. Poikonen, *Light Sources in Radiometry and Photometry*, Aalto-yliopisto, S-108.4010 Licentiate Course on Measurement Science and Technology, Luentokalvot, 2013.
- [5] CIE, *Photometry - The CIE System of Physical Photometry*, Joint ISO/CIE Standard: ISO 23539:2005(E)/CIE S 010/E:2004.
- [6] M. Bass, E. Van Stryland, D. Williams ja W. Wolfe, *Handbook of Optics*, 2. painos, McGraw-Hill, 1995.
- [7] T. Pulli, T. Dönsberg, T. Poikonen, F. Manoocheri, P. Kärhä and E. Ikonen, "Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry," *Light: Science & Applications*, vol. 47, pp. 1-7, 2015.
- [8] UDT Instruments, "The Guide To Photometry".
- [9] Suomen Standardisoimisliitto, SI opas, SFS, 2002.
- [10] Instrument System GMBH, *Handbook of LED Metrology*.
- [11] Á. Borbély, Á. Sámson and J. Schanda, "The concept of correlated colour temperature revisited," *Color Research & Application*, vol. 26, pp. 450 - 457, 2001.
- [12] T. Dönsberg, T. Pulli, M. Sildoja, T. Poikonen, H. Baumgartner, F. Manoocheri, P. Kärhä ja E. Ikonen, "Methods for decreasing uncertainties in LED photometry," *Metrology: 17th International Congress of Metrology*, 2015.
- [13] K. Carr, "Integrating sphere theory and applications Part II: Integrating sphere applications," *Surface Coatings International*, vol. 80, pp. 485-490, 1997.
- [14] T. Poikonen, T. Pulli, A. Vaskuri, H. Baumgartner, P. Kärhä ja E. Ikonen, "Luminous efficacy measurement of solid-state lamps," *Metrologia*, vol. 49, pp. 135-140, 2012.
- [15] A. Bergh and P. Dean, "Light-Emitting Diode," *Proceeding of The IEEE*, vol. 60, pp. 156-223, 1972.

- [16] J. Clemens ja L. Poppe, Thermal Management for LED Applications, Springer, 2014.
- [17] K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi ja Y. Shimizu, "Development of High-bright and Pure-white LED Lamps," *LUX PACIFICA '97 3rd PACIFIC BASIN LIGHTING CONGRESS*, pp. 2-4, 1997.
- [18] T. Dönsberg, T. Pulli, T. Poikonen, H. Baumgartner, A. Vaskuri, E. Sildoja, F. Manoocheri, P. Kärhä and E. Ikonen, "New source and detector technology for the realization of photometric units," *Metrologia*, vol. 51, pp. 276-281, 2014.
- [19] N. Narendran and Y. Gu, "Life of LED-Based White Light Sources," *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, vol. 1, pp. 167-171, 2005.
- [20] H. Baumgartner, D. Renoux, P. Kärhä, T. Poikonen, T. Pulli, E. Ikonen, "Natural and accelerated ageing of LED lamps," *Lighting Res. Technol.*, vol. 48, pp. 930-942, 2016.
- [21] C. Bieber, "LED Light Emission as a Function of Thermal Conditions," *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, IEEE*, 2008.
- [22] Samsung, *LM516B*, Datalehti, Rev: 001.
- [23] IES LM-79-08, Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products, Illuminating Engineering Society, 2008.
- [24] Thermocouple, *PT100 Resistance Table*, Technical Datasheet, TD-TV/PT1A.
- [25] E. Thermodynamics, *APH-127-10-25-S*, Datalehti.